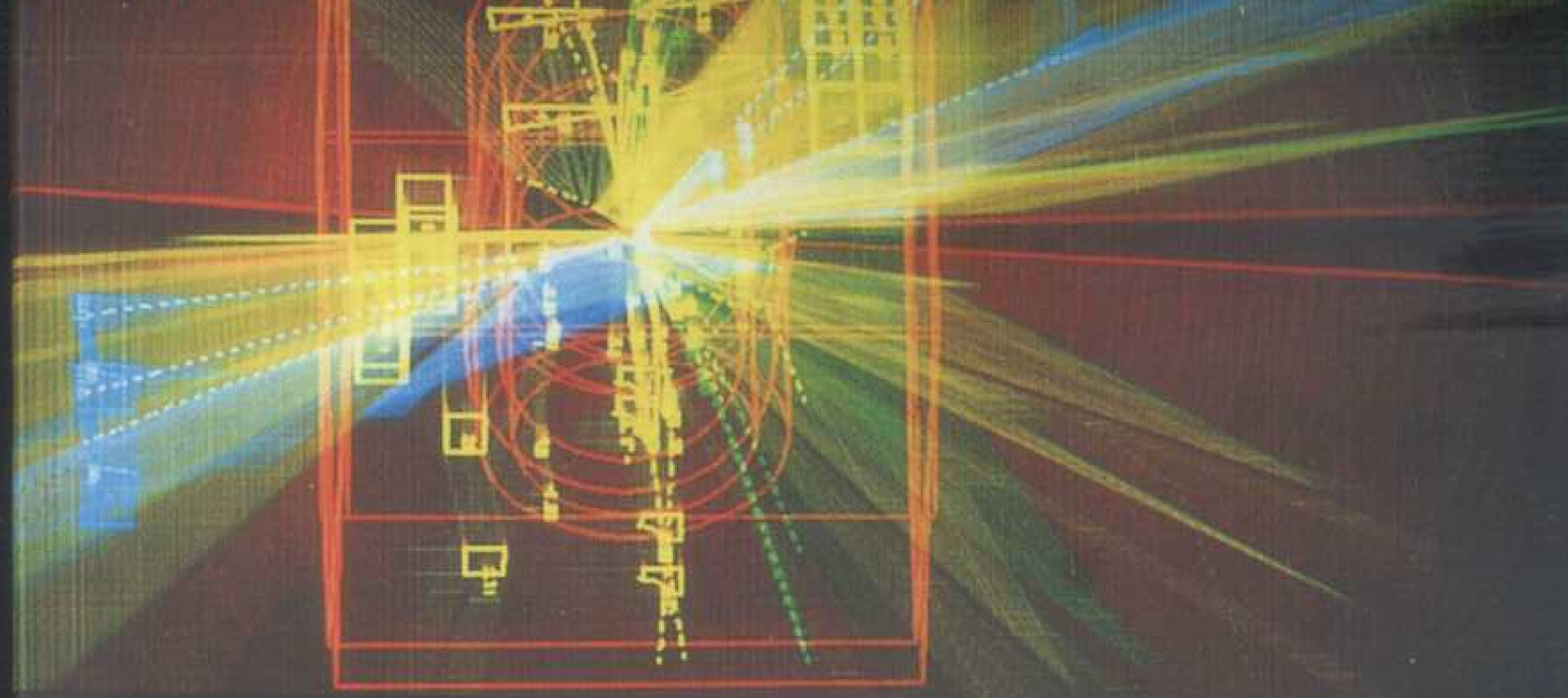


Hace poco más de sesenta años que Frédéric e Irène Joliot-Curie (1934) descubrieron la posibilidad de formar artificialmente unos núcleos radiactivos desconocidos en la naturaleza.
Este descubrimiento, que había seguido los trabajos de Pierre y Marie Curie, marcó el inicio del dominio de las fuerzas nucleares en el campo de la física y química.
La fabricación de los radioelementos artificiales iba a provocar el descubrimiento de nuevas técnicas biológicas, médicas e industriales.
Este libro, que constituye un pequeño homenaje a los descubridores de la radiactividad artificial, narra los distintos caminos y las múltiples peripecias científicas que tuvieron que vencerse para poder llegar a tan gran descubrimiento.

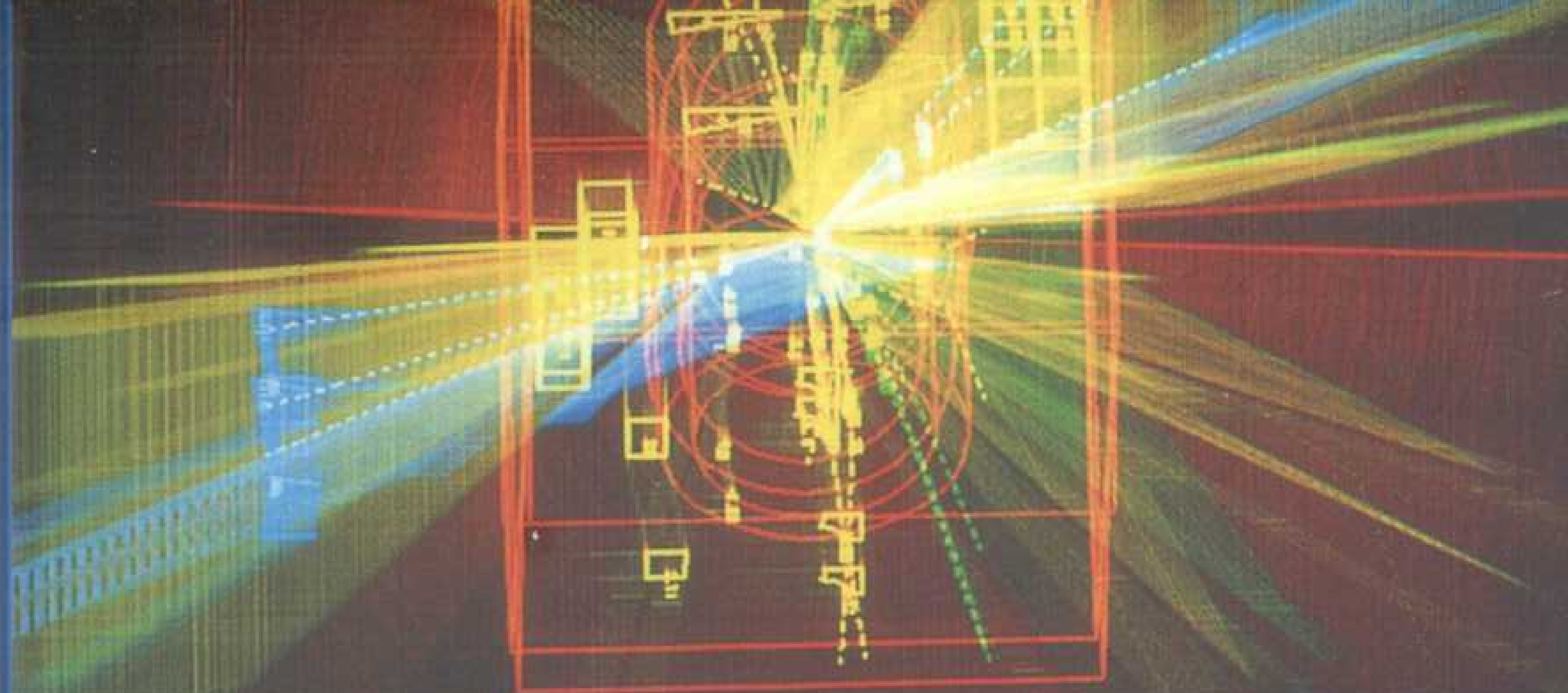
Pierre Radvanyi es físico nuclear, director de investigación del CNRS y director adjunto del Laboratorio Nacional Saturne en Saclay.
Monique Bordry es responsable de los archivos Pierre y Marie Curie y Frédéric e Irène Joliot-Curie, y ayudante de investigación del Laboratorio Nacional Saturne.

La radiactividad artificial

P. Radvanyi
M. Bordry

90





La radiactividad artificial

P. Radvanyi
M. Bordry

Biblioteca Científica Salvat

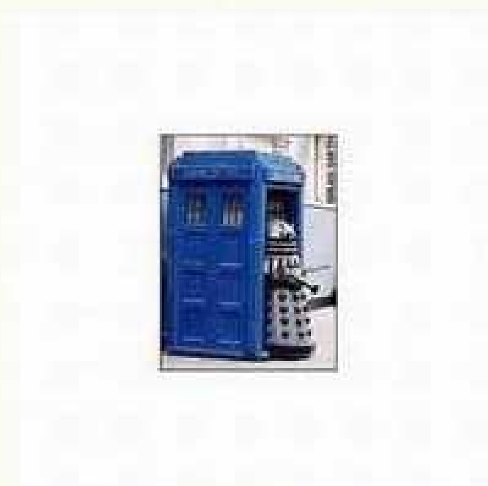






La radiactividad artificial

Biblioteca
Científica
Salvat



La radiactividad artificial

P. Radvanyi
M. Bordry

SALVAT

Versión española de la obra original francesa
La radioactivité artificielle, publicada por Éditions du Seuil de París

Traducción: Claudi Mans
Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass
Foto de cubierta: David Parker / Science Photo Library

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8970-2 (Volumen 90)
Depósito Legal: B-6420-1995
Publicada por Salvat Editores, S.A., Barcelona
Impresa por Printer, i.g.s.a. Marzo 1995
Printed in Spain

ÍNDICE

PREFACIO

Hemos preparado este libro en ocasión del cincuentenario del descubrimiento de la radiactividad artificial por Frédéric e Irène Joliot-Curie.

En los últimos tiempos, se ha hablado poco de estos grandes investigadores. Por lo tanto, es justo que hoy, en ocasión de este aniversario, tratemos de hacerlos revivir y rememoremos la serie de experimentos admirables que realizaron.

El descubrimiento de los radioelementos creados artificialmente tuvo lugar treinta y seis años después del de los primeros elementos radiactivos que existen en la naturaleza. Es muy notable que estos dos descubrimientos, vinculados científicamente, hayan sido realizados en el seno de una misma familia, en el intervalo de una generación.

La presente obra está destinada al público en general interesado en el desarrollo de las ciencias de la naturaleza.

Se describen en ella las investigaciones que condujeron a la radiactividad artificial, su realización y sus consecuencias; no pretende ser un manual de física nuclear, si bien es obvio que ciertas nociones de ésta deben hacerse accesibles al lector.

Hemos querido relatar una aventura apasionante mezclando la explicación científica, la historia de las ciencias y la vida de los personajes que han hecho esta historia.

Uno de nosotros (P.R.) preparó su tesis doctoral bajo la dirección de Frédéric Joliot, en el Collège de France, y tuvo la fortuna de poder colaborar con él, en París y, después, en Orsay, durante los últimos años de la vida del científico.

El otro (M.B.), que entró a formar parte del equipo del laboratorio de Orsay cuando estaba aún impregnado de la personalidad de sus fundadores, ha dedicado buena parte de su tiempo a estudiar las cartas, los cuadernos y los documentos que dejaron Pierre y Marie Curie y, más tarde Frédéric e Irène Joliot-Curie.

Agradecemos al señor Ladislas Goldstein —uno de los testigos de los descubrimientos— el relato que amablemente nos ha hecho de ciertos momentos del descubrimiento de la radiactividad artificial.

Damos las gracias también a todos aquellos, incluidos los miembros de nuestras familias, que nos han ayudado con sus críticas y nos han dado su apoyo.

Estamos agradecidos en particular a la señora H. Langevin-Joliot, y a los señores E. Guyon, H. Piatier y J. Yoccoz por haberse tomado la molestia de leer nuestro manuscrito y habernos ayudado con sus observaciones, así como al señor L. Michel por haberse prestado a responder a nuestras preguntas. Las sugerencias del director de la Colección «Points Sciences», J. M. Lévy-Leblond, nos han sido muy útiles.

Hemos sacado provecho de los documentos de síntesis preparados por el grupo de trabajo biomédico en ocasión del quincuagésimo aniversario del descubrimiento de la radiactividad artificial. Nuestro agradecimiento también para la señora M. M. Lèbre, documentalista del Laboratorio Nacional Saturno, para el señor A. Q. Morton, del Science Museum de Londres, y muy especialmente para la Asociación Frédéric e Irène Joliot-Curie y el laboratorio Curie por todos los documentos que han puesto a nuestra disposición.

1. INTRODUCCIÓN

Pocos sabios franceses del pasado, han conmovido o apasionado tanto a sus contemporáneos como Pierre y Marie Curie y, después de éstos, Frédéric e Irène Joliot-Curie. Sólo Louis Pasteur había despertado un interés parecido. El descubrimiento de sustancias que emitían radiaciones, en apariencia misteriosas, por una pareja de científicos tenía que impresionar a la opinión pública en una época en que la actividad científica de las mujeres era aún excepcional. La muerte prematura de Pierre Curie y la tenacidad de Marie Curie, que prosiguió en solitario los trabajos realizados en común, conmovieron al gran público. Y, curiosamente, treinta y seis años más tarde, la historia parecía repetirse; de nuevo, una joven pareja de científicos, la hija mayor de Pierre y Marie Curie y su marido, realizaba un descubrimiento fundamental, el de la radiactividad artificial, que ampliaba de golpe el campo abierto por la generación precedente.

Se sabía que la materia que formaba la Tierra estaba constituida por átomos que componían los diferentes elementos químicos. Estos átomos parecían estables; su propio nombre (átomo viene del griego *atomos:* «que no se puede dividir», según una intuición genial del filósofo griego Demócrito, en el siglo V antes de nuestra era) procedía de la creencia de que eran las partículas últimas de la materia. Pero a través de los trabajos de Pierre y Marie Curie y de los de Rutherford en especial, algunos de estos átomos se revelaban inestables; eran «radiactivos» y tenían una vida media característica: al emitir radiaciones, ciertos elementos químicos desaparecían mientras que se formaban otros distintos. Ésta era una

propiedad natural, intrínseca, de ciertos átomos pesados, como el uranio, el torio, el radio, etc.

El estudio de las radiaciones emitidas y de su origen, realizado en los laboratorios franceses, británicos, alemanes y austríacos permitió comprender que, en lo esencial, provenían no del conjunto del átomo sino de su núcleo central.

Frédéric e Irène Joliot-Curie, a principios de 1934, descubrieron que se podían formar de manera artificial, a partir de núcleos estables, otros núcleos nuevos, también radiactivos, de vida media corta. Para simplificar, se les denominó «radioelementos artificiales», para distinguirlos de los radioelementos «naturales», descubiertos por Pierre y Marie Curie, si bien su radiactividad era tan natural como la de sus predecesores. En los laboratorios de todo el mundo, se han producido nuevos radioelementos artificiales y hoy se conocen alrededor de 1.600. La mayor parte de ellos corresponden a elementos químicos conocidos, pero, como veremos, algunos de ellos representan elementos hasta entonces desconocidos, que no existen en forma estable.

Se constató que la radiactividad era un fenómeno universal: los radioelementos naturales, y sus descendientes, son los que se pueden encontrar en la naturaleza dado que, debido a su larga duración de vida, subsisten aún desde la época de su formación; los otros, los «artificiales» son los que, a causa de su duración de vida más corta, han tenido tiempo de descomponerse y desaparecer.

Puede imaginarse la satisfacción de los científicos al ver aparecer un fenómeno nuevo, que permitió discernir una explicación y un orden en medio de gran cantidad de observaciones en parte contradictorias. Al releer las memorias originales, quedamos a veces sorprendidos al constatar que ciertos descubrimientos capitales hayan podido realizarse con instrumentos que nos parecen muy simples, rudimentarios o de precario funcionamiento, cuando faltaba aún toda una serie de datos experimentales.

En la presente obra describiremos sucesivamente el período que se extiende desde los primeros trabajos de Pierre y Marie Curie hasta el descubrimiento de la radiactividad artificial, y después este descubrimiento en sí; a continuación, las investigaciones que ha generado hasta la Guerra Mundial, y por último la radiactividad tal como se manifiesta hoy en sus diferentes aspectos. El capítulo 2 es un capítulo de reposo y de iniciación, que reúne algunas explicaciones sucintas, necesarias para una buena comprensión del libro, sin que se indiquen siempre las referencias históricas.

El progreso de nuestros conocimientos, y en particular el desarrollo de las ciencias físicas, se efectúa por saltos bruscos, por discontinuidades, que corresponden a los descubrimientos importantes, seguidos de lentas aproximaciones, de acumulaciones pacientes y progresivas de resultados nuevos. Este avance puede dar la impresión de sobreabundancia, como un gran árbol de múltiples ramificaciones, que a veces se presentan paralelas y a veces entrecruzadas. Una exposición histórica puede optar así por seguir tal o cual rama.

En este libro, recorremos la rama de la radiactividad, sin tratar de bosquejar —como se haría en un libro de texto— un cuadro exhaustivo de todos los conocimientos nuevos que la física nuclear nos ha proporcionado.

EL ÁTOMO DE DEMÓCRITO Y DE LUCRECIO

El poeta y filósofo latino Lucrecio, hace algo más de dos mil años, recogía así el razonamiento intuitivo de Demócrito, en el Libro I de su *De Rerum Natura:*

«En los cuerpos, se pueden distinguir los elementos primeros de las cosas (los átomos), y los objetos compuestos formados por la reunión de estos elementos. En cuanto a los elementos primeros, ninguna fuerza es capaz de destruirlos, ya que su solidez resiste finalmente toda agresión [...]
»Puesto que existe una cúspide extrema donde termina este cuerpo elemental, que ya deja de ser perceptible a nuestros sentidos, este último elemento está, evidentemente, exento de partes y alcanza el último grado de pequeñez [...]
»Por otra parte, si no hubiera término en la pequeñez, los cuerpos más pequeños estarían compuestos por una infinidad de partes, puesto que cada mitad de mitad tendría siempre una mitad, y esto hasta el infinito. ¿Qué diferencia habría entonces entre el propio Universo y el cuerpo más pequeño? No podríamos establecer ninguna, ya que por más infinitamente extenso que sea el conjunto del Universo, los cuerpos más pequeños también estarían compuestos de una infinidad de partes. Al sentido común le repugna esta idea y no admite que el espíritu pueda creer en ello, por lo que es necesario rendirse y reconocer que existen partículas que dejan de ser divisibles en partes y que alcanzan los límites de la pequeñez. Y puesto que estas partículas existen, debes reconocer que los elementos que están formados por ellas son igualmente sólidos y eternos.»

2. ALGUNAS EXPLICACIONES PREVIAS

1. ELEMENTOS QUÍMICOS, MOLÉCULAS Y ÁTOMOS

La materia inerte y la materia viva están formadas por cuerpos puros o por mezclas; los cuerpos puros están constituidos por uno o más elementos químicos, que a su vez están compuestos por un gran número de moléculas idénticas, cada una de las cuales agrupa uno o más átomos (a veces incluso algunos millares en la materia viva). Ejemplo de molécula simple: la del agua, constituida por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno: se escribe simbólicamente H_2O. El átomo es la unidad más pequeña, la porción más pequeña de un elemento químico; es la parte más pequeña de un cuerpo que puede participar en la formación de una molécula. Si se rompe en dos el núcleo de un átomo (cosa que se puede hacer, como veremos a lo largo de esta obra), se forman átomos de elementos químicos diferentes.

El átomo es muy pequeño; la «masa atómica» de un elemento, o sea 1,008 g de hidrógeno ó 12 g de carbono 12 (estos doce gramos de carbono constituyen la masa de referencia), contiene siempre el mismo número de átomos, es decir, $6{,}022 \cdot 10^{23}$ átomos. En un número enorme: 10^{23} es un 1 seguido de 23 ceros, es decir 100.000 trillones. El diámetro de un átomo de hidrógeno es del orden de 10^{-10} metros; 10^{-10} es, por definición, igual a $1/10^{10}$, o sea un número muy pequeño: una diez mil millonésima (1/10.000.000.000).

Existe en la naturaleza un número limitado de elementos químicos; el más ligero es el hidrógeno, H, de masa atómica 1,008 g, y el más pesado el uranio, U, de masa atómica 238,01 g. Hacia 1870, el

científico ruso Mendeleiev comprobó que si se ordenaban todos los elementos químicos según sus masas atómicas crecientes, se encontraban periódicamente unas propiedades químicas o físicas parecidas. Mendeleiev propuso clasificar todos los elementos en una tabla (véase pág. 6), de manera que los elementos situados en una misma columna tuvieran características parecidas: se tiene así la columna de los halógenos F, Cl, Br, I... o la de los metales alcalinos Li, Na, K, Rb... Cada elemento de la tabla recibió un número de orden; este «número atómico» no encontró su interpretación física hasta algunas décadas más tarde. Había casillas vacías, que se llenaron a medida que se descubrieron nuevos elementos.

En 1897, y de forma independiente, J. J. Thomson, Wiechert y Kaufmann, basándose en una serie de trabajos experimentales, entre ellos los de Jean Perrin, mostraron que el átomo contenía unos corpúsculos aún más pequeños, los electrones, que poseían una carga eléctrica negativa y una masa que era más o menos 1/2 000 de la masa de un átomo de hidrógeno. Los electrones libres son los portadores de la corriente eléctrica.

Las investigaciones que se describen más adelante permitieron establecer que el átomo estaba a su vez constituido por un pequeño núcleo central de carga eléctrica positiva, en el que estaba concentrada casi toda la masa, y un conjunto de electrones que giraban alrededor de este núcleo (E. Rutherford, 1911). Gracias a estudios realizados con rayos X, fue posible descubrir que las propiedades físicas y químicas de un elemento estaban determinadas por el número Z de electrones del átomo. La carga eléctrica positiva del núcleo es igual a la carga negativa del conjunto de electrones. Y este número Z no es otra cosa que el número atómico del elemento, que determinaba su lugar en la clasificación periódica de Mendeleiev.

Un átomo es, pues, normalmente neutro desde el punto de vista eléctrico. Alrededor del núcleo, los electrones se reparten en capas

◄Tabla de Mendeleiev: clasificación periódica de los elementos, tal como aparece en la actualidad. La serie de los lantánidos y la de los actínicos se insertan por completo en las dos casillas 57-71 y 89-103 de la tabla, respectivamente. En gris, elementos creados de manera por entero artificial. Los elementos de descubrimiento reciente, que todavía no han recibido un nombre universalmente admitido, se indican sólo por su número atómico.

CLAVE

NUMERO ATOMICO	MASA ATOMICA	SIMBOLO	ESTRUCTURA ELECTRONICA	NOMBRE
45	102.905	Rh	$[Kr] 4d^8 5s^1$	Rodio

PERIODO	GRUPO IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIII	VIII	VIII	IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	GASES NOBLES
1	1 H 1.00797 Hidrógeno																	2 He 4.0026 Helio
2	3 Li 6.939 $1s^2 2s^1$ Litio	4 Be 9.0122 $1s^2 2s^2$ Berilio											5 B 10.811 $1s^2 2s^2 2p^1$ Boro	6 C 12.0111 $1s^2 2s^2 2p^2$ Carbono	7 N 14.0067 $1s^2 2s^2 2p^3$ Nitrógeno	8 O 15.9994 $1s^2 2s^2 2p^4$ Oxígeno	9 F 18.9984 $1s^2 2s^2 2p^5$ Flúor	10 Ne 20.183 $1s^2 2s^2 2p^6$ Neón
3	11 Na 22.9898 $Ne\ 3s^1$ Sodio	12 Mg 24.312 $Ne\ 3s^2$ Magnesio											13 Al 26.9815 $Ne\ 3s^2 3p^1$ Aluminio	14 Si 28.086 $Ne\ 3s^2 3p^2$ Silicio	15 P 30.9738 $Ne\ 3s^2 3p^3$ Fósforo	16 S 32.064 $Ne\ 3s^2 3p^4$ Azufre	17 Cl 35.453 $Ne\ 3s^2 3p^5$ Cloro	18 Ar 39.948 $Ne\ 3s^2 3p^6$ Argón
4	19 K 39.102 $Ar\ 4s^1$ Potasio	20 Ca 40.08 $Ar\ 4s^2$ Calcio	21 Sc 44.956 $Ar\ 3d^1 4s^2$ Escandio	22 Ti 47.90 $Ar\ 3d^2 4s^2$ Titanio	23 V 50.942 $Ar\ 3d^3 4s^2$ Vanadio	24 Cr 51.996 $Ar\ 3d^5 4s^1$ Cromo	25 Mn 54.938 $Ar\ 3d^5 4s^2$ Manganeso	26 Fe 55.847 $Ar\ 3d^6 4s^2$ Hierro	27 Co 58.933 $Ar\ 3d^7 4s^2$ Cobalto	28 Ni 58.71 $Ar\ 3d^8 4s^2$ Níquel	29 Cu 63.54 $Ar\ 3d^{10} 4s^1$ Cobre	30 Zn 65.37 $Ar\ 3d^{10} 4s^2$ Cinc	31 Ga 69.72 $Ar\ 3d^{10} 4s^2 4p^1$ Galio	32 Ge 72.59 $Ar\ 3d^{10} 4s^2 4p^2$ Germanio	33 As 74.922 $Ar\ 3d^{10} 4s^2 4p^3$ Arsénico	34 Se 78.96 $Ar\ 3d^{10} 4s^2 4p^4$ Selenio	35 Br 79.909 $Ar\ 3d^{10} 4s^2 4p^5$ Bromo	36 Kr 83.80 $Ar\ 3d^{10} 4s^2 4p^6$ Criptón
5	37 Rb 85.47 $Kr\ 5s^1$ Rubidio	38 Sr 87.62 $Kr\ 5s^2$ Estroncio	39 Y 88.905 $Kr\ 4d^1 5s^2$ Itrio	40 Zr 91.22 $Kr\ 4d^2 5s^2$ Circonio	41 Nb 92.906 $Kr\ 4d^4 5s^1$ Niobio	42 Mo 95.94 $Kr\ 4d^5 5s^1$ Molibdeno	43 Tc (99) $Kr\ 4d^6 5s^1$ Tecnecio	44 Ru 101.07 $Kr\ 4d^7 5s^1$ Rutenio	45 Rh 102.905 $Kr\ 4d^8 5s^1$ Rodio	46 Pd 106.4 $Kr\ 4d^{10} 5s^0$ Paladio	47 Ag 107.870 $Kr\ 4d^{10} 5s^1$ Plata	48 Cd 112.40 $Kr\ 4d^{10} 5s^2$ Cadmio	49 In 114.82 $Kr\ 4d^{10} 5s^2 5p^1$ Indio	50 Sn 118.69 $Kr\ 4d^{10} 5s^2 5p^2$ Estaño	51 Sb 121.75 $Kr\ 4d^{10} 5s^2 5p^3$ Antimonio	52 Te 127.60 $Kr\ 4d^{10} 5s^2 5p^4$ Telurio	53 I 126.904 $Kr\ 4d^{10} 5s^2 5p^5$ Yodo	54 Xe 131.30 $Kr\ 4d^{10} 5s^2 5p^6$ Xenón
6	55 Cs 132.905 $Xe\ 6s^1$ Cesio	56 Ba 137.34 $Xe\ 6s^2$ Bario		72 Hf 178.49 $Xe\ 4f^{14} 5d^2 6s^2$ Hafnio	73 Ta 180.948 $Xe\ 4f^{14} 5d^3 6s^2$ Tántalo	74 W 183.85 $Xe\ 4f^{14} 5d^4 6s^2$ Tungsteno	75 Re 186.2 $Xe\ 4f^{14} 5d^5 6s^2$ Renio	76 Os 190.2 $Xe\ 4f^{14} 5d^6 6s^2$ Osmio	77 Ir 192.2 $Xe\ 4f^{14} 5d^7 6s^2$ Iridio	78 Pt 195.09 $Xe\ 4f^{14} 5d^9 6s^1$ Platino	.79 Au 196.967 $Xe\ 4f^{14} 5d^{10} 6s^1$ Oro	80 Hg 200.59 $Xe\ 4f^{14} 5d^{10} 6s^2$ Mercurio	81 Tl 204.37 $Xe\ 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^1$ Talio	82 Pb 207.19 $Xe\ 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^2$ Plomo	83 Bi 208.980 $Xe\ 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^3$ Bismuto	84 Po (210) $Xe\ 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^4$ Polonio	85 At (210) $Xe\ 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^5$ Astato	86 Rn (222) $Xe\ 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^6$ Radón
7	87 Fr (223) $Rn\ 7s^1$ Francio	88 Ra (226) $Rn\ 7s^2$ Radio		104 Ku $[Rn] 5f^{14} 6d^2 7s^2$ Kurchatovio	105 Ha $[Rn] 5f^{14} 6d^3 7s^2$ Hahnio	106 elemento 106												

PERIODO															
6	57 La 138.91 $Xe\ 5d^1 6s^2$ Lantano	58 Ce 140.12 $Xe\ 4f^2 5d^0 6s^2$ Cerio	59 Pr 140.907 $Xe\ 4f^3 5d^0 6s^2$ Praseodimio	60 Nd 144.24 $Xe\ 4f^4 5d^0 6s^2$ Neodimio	61 Pm (147) $Xe\ 4f^5 5d^0 6s^2$ Promecio	62 Sm 150.35 $Xe\ 4f^6 5d^0 6s^2$ Samario	63 Eu 151.96 $Xe\ 4f^7 5d^0 6s^2$ Europio	64 Gd 157.25 $Xe\ 4f^7 5d^1 6s^2$ Gadolinio	65 Tb 158.924 $[Xe] 4f^9 5d^0 6s^2$ Terbio	66 Dy 162.50 $Xe\ 4f^{10} 5d^0 6s^2$ Disprosio	67 Ho 164.930 $Xe\ 4f^{11} 5d^0 6s^2$ Holmio	68 Er 167.26 $Xe\ 4f^{12} 5d^0 6s^2$ Erbio	69 Tm 168.934 $Xe\ 4f^{13} 5d^0 6s^2$ Tulio	70 Yb 173.04 $Xe\ 4f^{14} 5d^0 6s^2$ Iterbio	71 Lu 174.97 $Xe\ 4f^{14} 5d^1 6s^2$ Lutecio
7	89 Ac (227) $Rn\ 6d^1 7s^2$ Actinio	90 Th 232.038 $Rn\ 6d^2 7s^2$ Torio	91 Pa (231) $Rn\ 5f^2 6d^1 7s^2$ Protactinio	92 U 238.04 $Rn\ 5f^3 6d^1 7s^2$ Uranio	93 Np (237) $Rn\ 5f^4 6d^1 7s^2$ Neptunio	94 Pu (242) $[Rn] 5f^6 6d^0 7s^2$ Plutonio	95 Am (243) $Rn\ 5f^7 6d^0 7s^2$ Americio	96 Cm (247) $Rn\ 5f^7 6d^1 7s^2$ Curio	97 Bk (247) $[Rn] 5f^8 6d^1 7s^2$ Berkelio	98 Cf (251) $[Rn] 5f^{10} 6d^0 7s^2$ Californio	99 Es (254) $[Rn] 5f^{11} 6d^0 7s^2$ Einstenio	100 Fm (253) $[Rn] 5f^{12} 6d^0 7s^2$ Fermio	101 Md (256) $[Rn] 5f^{13} 6d^0 7s^2$ Mendelevio	102 No (254) $[Rn] 5f^{14} 6d^0 7s^2$ Nobelio	103 (Lw) (257) $[Rn] 5f^{14} 6d^1 7s^2$ Laurencio

sucesivas; los electrones de la capa exterior son, en general, los responsables de las propiedades físicas y químicas del elemento. Ésta es la razón por la que los elementos de una misma columna de la tabla de Mendeleiev tienen propiedades parecidas; cada vez que se llena por completo una nueva capa nos encontramos con un átomo de gas noble que tiene escasas afinidades químicas. Existen diferentes métodos que permiten arrancar uno o más electrones a un átomo: se dice entonces que el átomo está «ionizado»; se transforma en un «ion» cuya carga total positiva es sensible a la acción de un campo magnético o eléctrico.

2. EL NÚCLEO

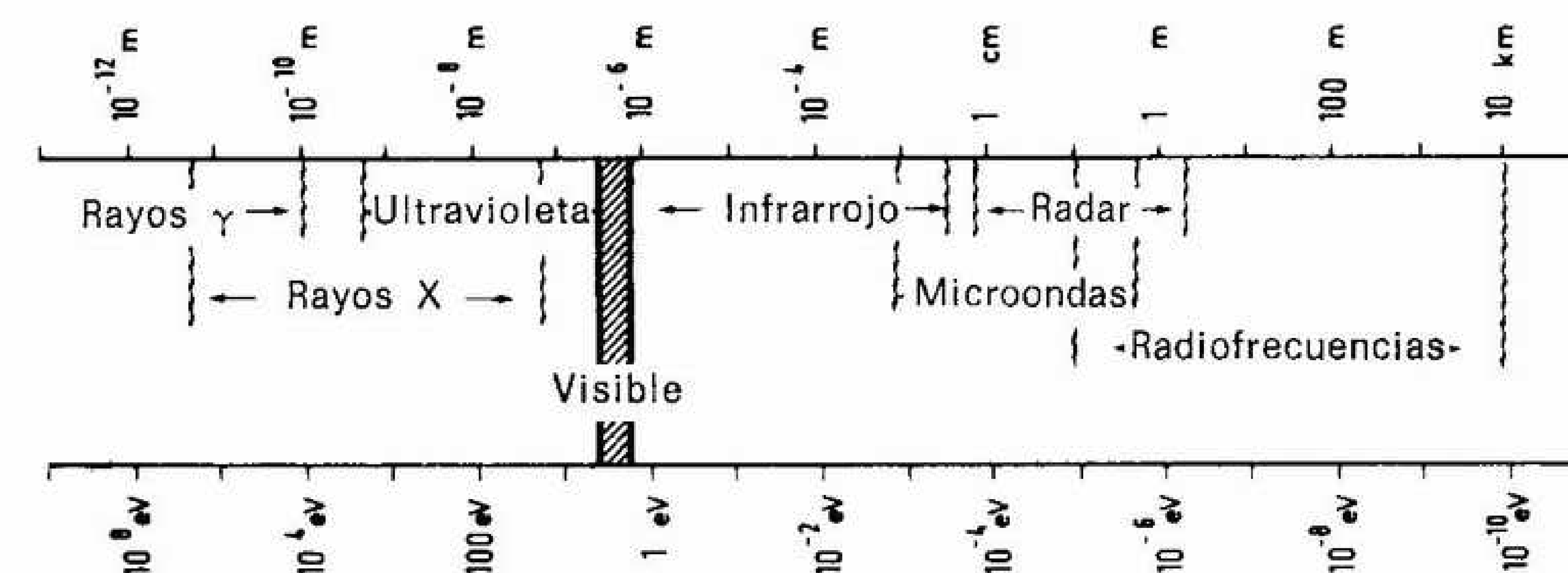
Como veremos de nuevo en el capítulo 4, el núcleo está constituido por un número A de nucleones; algunos de ellos están cargados positivamente, y son los Z protones; los otros son eléctricamente neutros, y son los N neutrones. Por tanto, para todo núcleo tenemos $A = Z + N$. Por ejemplo, un núcleo de hidrógeno ($A = 1$) está constituido simplemente por un protón. Un núcleo de helio ($A = 4$) —la partícula alfa (α), emitida por ciertos radioelementos naturales— está constituido por dos protones y dos neutrones; un núcleo de aluminio ($A = 27$), por 13 protones y 14 neutrones. Protones y neutrones tienen con poca diferencia la misma masa y prácticamente el mismo radio, del orden de $0{,}8 \cdot 10^{-15}$ m. Se ha encontrado, incluso mediante la experimentación que el volumen del núcleo es poco más o menos proporcional al número de nucleones que lo componen.

Los núcleos que corresponden al mismo elemento tienen siempre idéntico número de protones Z, que es igual al número de electrones del átomo; pueden, sin embargo, diferir en el número de neutrones; se les denomina entonces isótopos (del griego *isotopos:* que ocupan el mismo lugar). Así, la mayor parte de los núcleos de helio están compuestos por dos protones y dos neutrones; los hay también compuestos por dos protones y por un solo neutrón; son bien conocidos los dos principales isótopos del uranio: el uranio 238 (92 protones y 146 neutrones) y el uranio 235 (92 protones y 143 neutrones). Como se verá más adelante, existen isótopos estables e isótopos radiactivos.

Para simplificar la escritura, un núcleo dado se representa por el símbolo químico del elemento correspondiente; a su izquierda, arriba, se indica el número A de nucleones y, si es necesario, abajo, a la izquierda, el número Z; así, se escribe ${}^{4}_{2}He$, ${}^{3}_{2}He$, ${}^{27}_{13}Al$, ${}^{235}_{92}U$, ${}^{238}_{92}U$; se puede escribir simplemente ${}^{4}He$ o ${}^{238}U$, puesto que el símbolo químico de un átomo corresponde siempre a un número atómico dado.

3. FOTONES Y CUANTOS

Las ondas de radio, las ondas de radar, la radiación infrarroja, la luz visible desde el rojo al violeta, la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma (γ) son radiaciones de la misma naturaleza: radiaciones electromagnéticas; se les describe como si fueran una onda que se propaga, algo así como las olas en el mar. Sólo cambia su longitud de onda (que es la distancia entre dos máximos sucesivos) designada por la letra griega λ (véase el esquema adjunto).



Esquema del conjunto de radiaciones electromagnéticas en función de su energía y de su longitud de onda.

Todas estas radiaciones tienen la misma velocidad de propagación en el vacío, la velocidad de la luz, simbolizada por la letra *c*, es decir, $3 \cdot 10^8$ m/s; la frecuencia de la radiación (número de máximos por segundo), simbolizada por la letra griega ν, se deduce de la relación:

$$\lambda\nu = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Cuanto más pequeña es la longitud de onda, mayor es la frecuencia ν y, como se verá, mayor la energía. La frecuencia se mide en vibraciones o ciclos por segundo denominados hertzios (kilohertzio, megahertzio...).

A principios de este siglo, los físicos Max Planck y Albert Einstein demostraron que la radiación electromagnética estaba constituida, de hecho, por «granos de energía», «cuantos de radiación», denominados fotones; cada uno de estos fotones tiene una energía igual a

$$E = h\nu \qquad (1)$$

donde h es la constante de Planck, igual a $6{,}63 \cdot 10^{-34}$ julios por segundo, o también, en unidades de física nuclear, $4{,}14 \cdot 10^{-15}$ eV.s.

---

1. ELECTRONVOLTIO

El electronvoltio (eV) se define como la energía adquirida por un electrón acelerado a través de una diferencia de potencial de 1 voltio. A partir de esto, se obtienen las unidades derivadas: el kiloelectronvoltio (keV) = 1.000 eV; el millón de electronvoltios (megaelectronvoltio), llamado MeV; los mil millones de electronvoltios (gigaelectronvoltio), llamados GeV.
Un electronvoltio es igual a $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ julios.

El efecto fotoeléctrico ilustra con claridad la existencia de fotones y la relación (1) arriba indicada: cuando se ilumina un electrodo metálico mediante una radiación luminosa que pasa sucesivamente del rojo al violeta, se aprecia que a partir de cierto color, esto es, a partir de cierta longitud de onda, se consigue arrancar electrones del metal. La intensidad de la radiación no influye, y es sólo la longitud de onda la que determina el fenómeno. Éste es el efecto denominado fotoeléctrico, por el cual un fotón es absorbido por el átomo, que expulsa un electrón. El fotón, para arrancar un electrón al metal, debe tener, como mínimo, una energía igual a la que une el electrón a ese metal. La diferencia entre la energía del fotón y la energía de enlace del electrón aparece bajo la forma de energía cinética del electrón arrancado. Por ejemplo, para arrancar un electrón exterior del cobre es preciso suministrar 4,65 electronvoltios, que corresponden a la longitud de onda de $2\,667 \cdot 10^{-10}$ m, que está en la gama del ultravioleta. El aspecto corpuscular del fotón aparece, de una manera particularmente espectacular, en el efecto Compton (observado por el físico norteamericano A. H. Compton, en 1923), en el cual un fotón choca con un electrón (un poco como un choque entre dos bolas de billar, en mecánica clásica), con lo que pierde parte de su energía y aumenta su longitud de onda.

4. LA RELATIVIDAD RESTRINGIDA

A finales del siglo XIX, los físicos se interrogaban sobre la velocidad de la luz en diferentes condiciones. Por ejemplo, la velocidad de la luz del Sol, medida en la Tierra en movimiento alrededor de su órbita, ¿era la misma que la de la luz emitida por una fuente de radiación terrestre? La respuesta experimental —inesperada— fue afirmativa, y A. Einstein, en 1905, formuló lo que se ha denominado relatividad restringida: la velocidad de la luz en el vacío es una velocidad límite c (de unos $3 \cdot 10^8$ m/s); esta velocidad es invariante (como las leyes de la física, en general), es decir, es la misma para dos observadores tanto si están inmóviles o en movimiento uniforme uno respecto a otro. A partir de ello, Einstein dedujo sus célebres relaciones. El intervalo de tiempo (t) entre dos acontecimientos, por ejemplo, es relativo, y depende de la velocidad (v) del observador, con respecto al referencial en el que los dos acontecimientos tienen lugar:

$$t = t_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

La cantidad de movimiento (p) que, para pequeñas velocidades, es igual al producto de la masa (m) por su velocidad, para una velocidad que ya no sea despreciable frente a la de la luz, se transforma en:

$$p = m\,v/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Estas ecuaciones tienen una apariencia muy abstracta. Para un físico nuclear, no hay problema. Tomemos unas partículas, como los mesones π (observados por primera vez en la radiación cósmica, véase recuadro pág. 68). Son partículas cuya duración de vida es muy corta ($2{,}6 \cdot 10^{-8}$ s para un π en reposo). Hagámosles atravesar un instrumento de medida de algunos metros de longitud, como, por ejemplo, un espectrómetro magnético. A la salida, a causa de esa corta duración de vida, sólo subsistirá una fracción de ellas, pero esta fracción dependerá de la energía de los mesones π: cuanto más se acerque su velocidad a la de la luz, más larga aparecerá su duración de vida. Por el contrario, un observador que viajara en un mesón π mediría siempre la misma duración de vida (la indicada más arriba). Lo mismo ocurre con la masa de una partícula: aceleremos un protón en un ciclotrón. En el caso de protones de baja velocidad, el efecto no será mensurable. Pero, a partir de cierta energía cinética, que corresponde a una velocidad



Albert Einstein

del orden de 10 a 20 % de la velocidad de la luz, podremos comprobar que la inercia del protón aumenta: todo ocurre como si, en apariencia, la masa del protón aumentara. Esto deberá tenerse en cuenta en la construcción de grandes aceleradores de partículas.

De todo ello se deduce también la equivalencia de la masa[1] y la energía según la célebre ecuación de Einstein:

$$E = mc^2$$

Esta ecuación se revela impresionante cuando se transforma en números a escala humana: indica, por ejemplo, que un kilogramo de materia, convertido *enteramente* en energía, proporcionaría 25 mil millones de kilovatios-hora, cifra que es del orden del 10 % del consumo francés de energía eléctrica durante un año.

[1] A veces se denomina masa en reposo.

Como se verá repetidas veces en este libro, una partícula puede transformarse en radiación y viceversa, según la citada ecuación de Einstein.

5. ÁTOMO DE BOHR, ENERGÍA DE ENLACE, MECÁNICA CUÁNTICA, SPIN

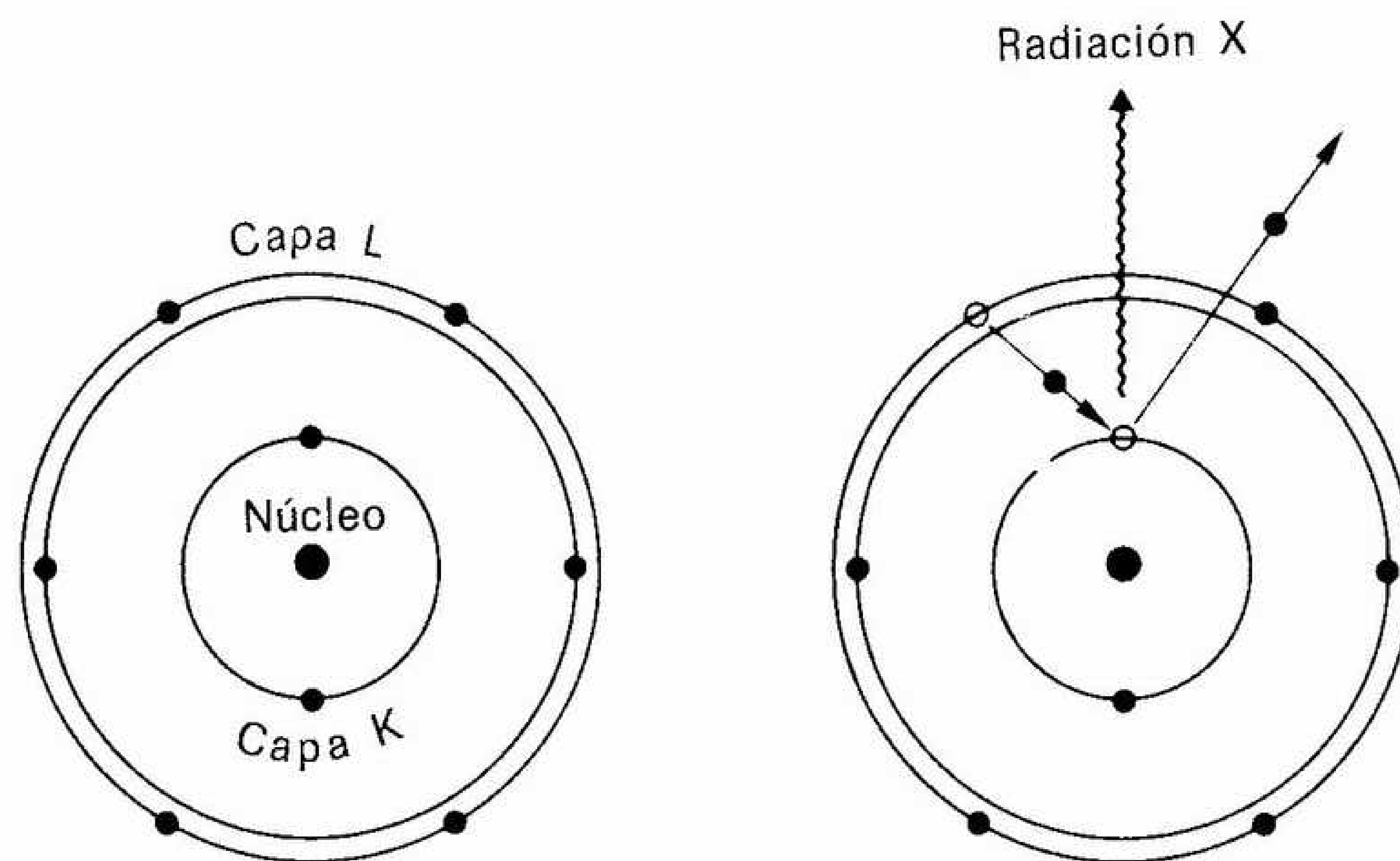
Niels Bohr fue el primero que, sobre la base del descubrimiento del núcleo por E. Rutherford y de lo que se sabía experimentalmente acerca de las rayas de la radiación X, describió el átomo como una especie de sistema planetario. Los electrones sólo podían seguir ciertas órbitas bien definidas, correspondientes a una energía y a un movimiento muy determinados: el movimiento y la energía de los electrones estaban cuantificados. El átomo estable, que se encuentra entonces en su «estado fundamental» puede ser excitado. Un electrón salta entonces de su órbita normal (de su capa normal) a otra órbita más exterior. Puede también ionizarse, cuando se arranca uno de los electrones de su capa. Es necesario *suministrar* energía para crear así un «agujero» —un vacío— en una órbita interna; un electrón de una capa exterior o un electrón de paso irá a ocupar este agujero y *liberará* la misma cantidad de energía. La energía necesaria para arrancar por completo el electrón es la energía de enlace del electrón de la capa considerada.

De la misma manera, es posible arrancar un nucleón de un núcleo; y el núcleo, en ciertas circunstancias, puede absorber un nucleón provinente del exterior. La energía puesta en juego entonces es la energía de enlace de este nucleón en el núcleo.

Hemos visto que, para la luz y los rayos X, sus aspectos ondulatorio y corpuscular estaban íntimamente ligados. Louis de Broglie, en 1924, tuvo la intuición de que esta propiedad no era privativa de los fotones sino que debía mostrarse también en el caso de las partículas que tenían masa, como el electrón o el protón. Demostró que se podía asociar a toda partícula, cuya cantidad de movimiento era p, una longitud de onda asociada:

$$\lambda = h/p$$

(donde h es de nuevo la constante de Planck). Esta relación fue



Átomo de oxígeno: *a la izquierda* se han esquematizado los 8 electrones que pertenecen a las capas K y L del átomo; *a la derecha,* un electrón K es expulsado del átomo, un electrón de la capa L viene entonces a reemplazarlo. La energía de enlace liberada puede emitirse en forma de una raya X característica.

verificada de manera brillante poco después por investigadores norteamericanos e ingleses.

En los años que siguieron, los físicos E. Schrödinger y W. Heisenberg, M. Born y luego P. A. M. Dirac, desarrollaron la mecánica cuántica, que se aplica a la microfísica, y que tiende a la mecánica llamada clásica cuando los sistemas pasan a ser grandes. La descripción de la mecánica cuántica rebasa el marco de esta obra y remitimos al lector interesado a libros especialmente dedicados a esto. La mecánica cuántica se apoya hoy sobre un conjunto muy grande de observaciones experimentales que abarcan las moléculas, los átomos, los núcleos y las partículas elementales. Tiene un considerable poder de predicción, una vez se han determinado las leyes de interacción.

Mencionemos aquí simplemente algunas propiedades que iremos encontrando a lo largo del libro, que se explican bien en mecánica cuántica pero que serían incomprensibles en mecánica clásica:

— en un átomo, un electrón en movimiento, desde el punto de vista clásico, debería ceder energía, por radiación, enlentecer por

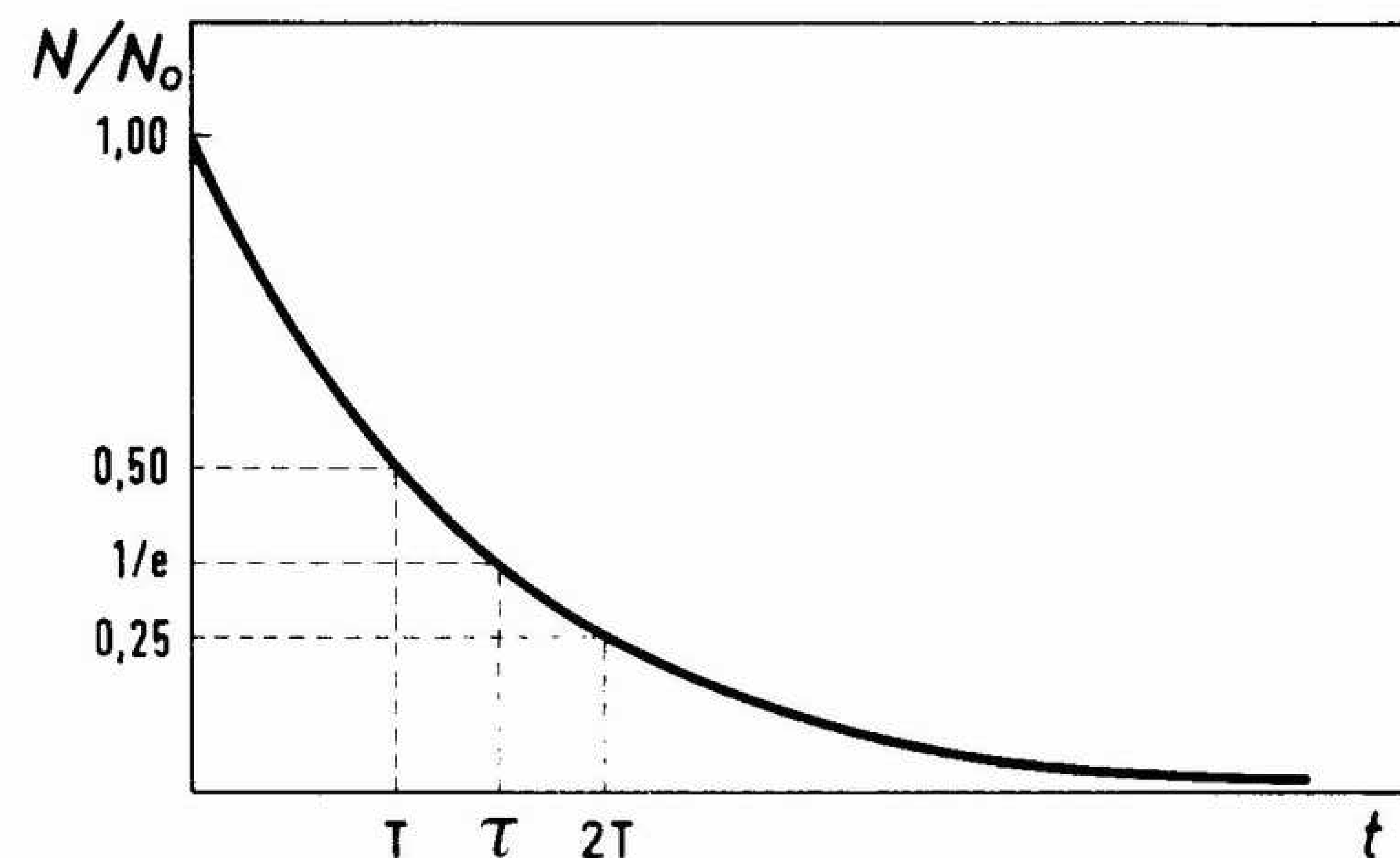
2. DECRECIMIENTO DE UN RADIOELEMENTO, VIDA MEDIA, PERÍODO

E. Rutherford y F. Soddy pudieron establecer, en 1903, la ley de transformación de los cuerpos radiactivos: el número, *n,* de átomos radiactivos de una misma especie que se transforman —se «desintegran»— por unidad de tiempo (y, también, por consiguiente, el número de «rayos» emitidos) es proporcional al número total N de átomos presentes. Tenemos: $n = \Lambda N$. La constante de proporcionalidad se ha llamado constante radiactiva: cuanto mayor es, con más rapidez se desintegra la sustancia; El inverso de esta constante es la vida media de la sustancia radiactiva $\tau = 1/\Lambda$.
De ello se deduce que los cuerpos radiactivos decrecen exponencialmente a lo largo del tiempo:

$$N = N_0 e^{-\Lambda t}$$

donde *t* designa el tiempo, y N_0 el número total de átomos presentes en el tiempo $t = 0$.
En vez de utilizar la vida media, científicos e ingenieros prefieren emplear el «período de semidesintegración» o, simplemente, «período» T (que los anglosajones llaman «half-life»), tiempo al cabo del cual el número total de átomos presentes ha disminuido a la mitad ($N/N_0 = 1/2$); se tiene, pues, para el período:

$$T = 0{,}693\ \tau = 0{,}693/\Lambda.$$



Decrecimiento (desintegración espontánea) exponencial de un radioelemento: En el momento $t = 0$ existen N_0 átomos. Al cabo de un tiempo T (período), sólo subsiste la mitad; al cabo de 2T, 1/4, y así sucesivamente. τ es la vida media.

Al cabo de 2 períodos, sólo se tiene (1/2) · (1/2) = 1/4 del número de átomos iniciales; al cabo de 3 períodos, 1/8; al cabo de 10 períodos, sólo subsisten 1/1024.
Cada radioelemento tiene su constante radiactiva, su propio período característico, que no se puede modificar. Se ha intentado, durante largo tiempo, en los principios de la radiactividad, observar una eventual modificación de esta constante radiactiva debida a agentes exteriores (grandes presiones, altas temperaturas e incluso la rotación de la Tierra). Se ha terminado por rendirse a la evidencia: la constante radiactiva es realmente constante; es una propiedad intrínseca de los núcleos. El uranio 238 tiene, así, un período de 4.500 millones de años, el radio, de 1.600 años, el polonio, de 138 días, y el primer radioelemento artificial creado por el hombre, el fósforo 30, tiene un período de 2,55 minutos.
Las partículas elementales inestables se desintegran en las mismas condiciones, es decir, según una ley de probabilidad exponencial, con una vida media característica definitiva como antes se ha visto. Así, el mesón π tiene una vida media de $2,6 \cdot 10^{-8}$ segundos.

---

tanto su movimiento y «caer» en el núcleo. No ocurre nada de esto: los movimientos electrónicos corresponden a estados «estacionarios» bien definidos. En particular, existe un estado estable, denominado «fundamental», cuya energía es mínima;

— supongamos una fuente radiactiva, que se desintegra poco a poco a lo largo del tiempo, con un período determinado; el ritmo de desaparición de los núcleos radiactivos y de formación de nuevos núcleos se conoce perfectamente y puede calcularse. Pero, si consideramos un núcleo radiactivo en particular, no sabremos en absoluto en qué momento preciso se producirá la desintegración, si bien todos los núcleos son idénticos e indiscernibles y hablar de un núcleo en concreto no tiene demasiado sentido;

— una partícula alfa, habida cuenta de su energía, tiene mucha dificultad para entrar o salir de un núcleo. Encuentra, en efecto, lo que se llama «la barrera de energía coulombiana», que corresponde a una interacción eléctrica de repulsión (las cargas del mismo signo se repelen). En mecánica clásica, una partícula α de un radioelemento natural no podría entrar ni salir del núcleo. En cambio, en mecánica cuántica, la partícula alfa tiene cierta probabilidad de pasar a través de la barrera por un efecto llamado «túnel». Volveremos a hablar de este efecto en el capítulo 3.

En 1924-1925, al desarrollar el modelo de Bohr del átomo, en el cual el movimiento de los electrones está definido por varios «números cuánticos», y al esforzarse en explicar los espectros discretos de rayas atómicas observados de manera experimental, el joven teórico W. Pauli formuló su «principio de exclusión». Mostró que dos electrones no podían ocupar, en un átomo, el mismo estado de movimiento, caracterizado por cuatro números cuánticos. Gracias al principio de Pauli, ha sido posible comprender el llenado sucesivo de las capas electrónicas de los átomos, cuando se avanza del más ligero hacia el más pesado. En 1925, S. A. Goudsmit y G. Uhlenbeck formularon la hipótesis de que el electrón tiene una especie de movimiento de rotación intrínseco alrededor de su eje, análogo al de un trompo. Este movimiento, que corresponde al cuarto número cuántico de Pauli, recibió el nombre de spin. El spin del electrón sólo puede tomar dos valores, $\pm (1/2)\, h/2\pi$, que suele escribirse $\pm 1/2$, sobreentendiéndose que se trata de unidades $h/2\pi$. Además, una carga eléctrica que gira alrededor de su eje, produce un momento magnético, con lo que el electrón pasa a ser análogo a un pequeño imán (como todas las demás partículas cargadas cuyo spin no sea nulo).

6. LAS CUATRO INTERACCIONES FUNDAMENTALES

Se conocen, hoy, cuatro interacciones fundamentales. Estas interacciones se distinguen por su naturaleza, su intensidad y también por su alcance, lo que puede llamarse su radio de acción.

Históricamente, la primera interacción que se estudió fue la atracción universal, que engloba tanto la interacción gravitacional entre las estrellas y los planetas, como la fuerza de gravedad que actúa sobre todos los objetos de nuestro entorno (Newton, finales del siglo XVII).

La segunda en evidenciarse fue la interacción electromagnética, interacción entre cargas eléctricas inmóviles o en movimiento, estudiada en el siglo pasado (Ampère, Faraday, Maxwell). Esta interacción electromagnética se manifiesta en las reacciones químicas. Es responsable de la cohesión de los átomos y de las moléculas, así como de los cuerpos macroscópicos en general. Desempeña un gran papel en la vida corriente. Por ejemplo, es la que interviene cuando empujamos un objeto.

La tercera es la interacción «fuerte», que se ejerce entre los constituyentes del núcleo, los nucleones (protones o neutrones). Es la responsable de la cohesión de los núcleos.

La cuarta es la interacción «débil», responsable de la radiactivi-

dad beta (β) y de ciertas desintegraciones de partículas elementales (véanse los capítulos 4, 3.er apartado, página 75 y 7, 2.º apartado, página 170.

El cuadro adjunto da una idea de las intensidades relativas de estas interacciones.

La interacción fuerte es la más intensa, pero es de corto alcance (alrededor de $2 \cdot 10^{-15}$ m). La interacción débil tiene un alcance unas mil veces menor aún. La interacción electromagnética, así como la de gravitación, son de largo alcance.

Se cree que cada una de estas interacciones es transportada por una radiación o una partícula, cuyo intercambio entre las partículas en interacción materializa la fuerza. Así, la interacción fuerte corresponde en especial al intercambio de uno o más mesones π (cuya masa en reposo es de alrededor de 140 MeV).

La interacción electromagnética corresponde al intercambio de fotones. La interacción débil se realiza por intercambio de bosones pesados, las partículas $W\pm$ o Z^{o}, que acaban de ser descubiertos en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN), en Ginebra (sus masas equivalen a alrededor de 81 y 95 GeV). La interacción de gravitación se realizaría mediante el intercambio de gravitones, pero éstos no han podido aún descubrirse.

Los científicos se han esforzado —con cierto éxito en estos últimos años— en desarrollar teorías unificadas que describan y expliquen, en un mismo marco, las interacciones débil y electromagnética. Se trabaja ahora en lo que se ha denominado la gran unificación, es decir, la descripción unificada de las interacciones fuerte, electromagnética y débil. En la actualidad se están emprendiendo experimentos para verificar ciertas predicciones de estas teorías.

Las cuatro interacciones fundamentales

Interacción	Constante de acomplamiento	Alcance
Fuerte	~ 1	unos 10^{-15} m
Electromagnética	1/137	largo
Débil	$\sim 10^{-12}$	unos 10^{-18} m
Gravitación	$\sim 6 \cdot 10^{-39}$	largo

1. A título indicativo, y ya que no todas las interacciones tienen la misma forma, las constantes de acoplamiento nos dan una idea de la intensidad relativa de las diferentes interacciones.

3. LOS ORÍGENES: RADIACTIVIDAD NATURAL, INICIOS DE LA FÍSICA NUCLEAR

1. RADIOELEMENTOS NATURALES Y FAMILIAS RADIACTIVAS

En diciembre de 1895, un físico de la Universidad de Wurzburgo, en Alemania, Wilhelm K. Röntgen, publicó, en diecisiete puntos, un descubrimiento notable, fruto de un intenso trabajo: cuando un haz de rayos catódicos (que J. J. Thomson demostró poco después que era un haz de electrones) choca con la pared de vidrio de un tubo de vacío, esta pared resplandece y emite una radiación de propiedades sorprendentes. Esta nueva radiación, muy penetrante, es capaz de atravesar el aire, el vidrio, el papel y la madera; se propaga en línea recta, no se desvía por la acción de un campo eléctrico o magnético; electriza el aire, y, cuando se interpone la mano en su camino, puede observarse la sombra de los huesos de esta mano sobre una pantalla luminiscente o sobre una placa fotográfica. Esta radiación, tan misteriosa al principio, recibió el nombre de rayos X o rayos Röntgen. Röntgen supuso, y fue verificado, que los rayos X eran análogos a los rayos de luz, pero mucho más enérgicos (véase el recuadro de la página 20). En trabajos ulteriores, Röntgen utilizó, para producir rayos X, un anticátodo metálico en lugar de la pared de vidrio.

Pero, con anterioridad, el 20 de enero de 1896, tuvo lugar en París una sesión memorable en la Academia de Ciencias, en el curso de la cual Henri Poincaré mostró a los académicos las primeras radiografías que Röntgen acababa de enviarle, y emitió la hipótesis de que la emisión de los rayos X y la fosforescencia del vidrio eran fenómenos asociados. Un académico presente en la sesión, Henri Becquerel, emprendió enseguida investigaciones pa-

1. ORIGEN DE LOS RAYOS X

Como se explica en el texto, la radiación X es una radiación electromagnética, igual que la luz o las ondas de radio, pero situada —en energía y en frecuencia— más allá del ultravioleta. Los espectros de la energía de los rayos X, producidos por el impacto de un haz de electrones sobre un blanco, comprenden, en general, dos componentes: el primero forma un espectro continuo y proviene de la energía liberada por el frenado de los electrones por la materia (también puede obtenerse un espectro continuo de rayos X por cambio de dirección de un haz de electrones); el segundo componente es un espectro de rayas discreto provinente de los átomos de la materia atravesada, a los cuales los electrones incidentes han arrancado electrones periféricos que pertenecen a tal o cual capa. Cuando un electrón es arrancado de una órbita electrónica interior, es reemplazado por un electrón de una capa externa que gana entonces energía de enlace. Esta diferencia de energía es emitida por el átomo en forma de una raya X característica. Puede también incidir sobre otro electrón del propio átomo, que entonces es expulsado (efecto Auger).

ra averiguar si determinadas sustancias fosforescentes emitían también radiaciones análogas a los rayos X. Entre esas sustancias, escogió una sal de uranio, el sulfato doble de uranilo y de potasio. Expuso esta sal al sol durante algunas horas; después, sobre una placa fotográfica envuelta en papel negro, Henri Becquerel dispuso dos láminas de la citada sal y una moneda de plata entre la placa y las láminas. En el revelado, aparecieron en la placa las láminas y la sombra de la moneda. H. Becquerel colocó las láminas en un cajón, sobre una placa fotográfica virgen. Pero al día siguiente, 26 de febrero de 1896, el cielo estaba cubierto; al cabo de algunos días, el sol reapareció. Antes de volver a exponer la sal de uranio al sol, comprobó en primer lugar el estado de la placa fotográfica no utilizada. Con gran asombro, comprobó que, si bien las láminas no se encontraban en estado de fosforescencia, la placa que había estado en contacto con ellas estaba fuertemente impresionada. La única explicación que le vino de inmediato a la mente fue que el uranio emitía, incluso sin aporte de luz solar, una radiación penetrante, de naturaleza desconocida. El 2 de marzo de 1896, una nota en las actas de la Academia de Ciencias anunció este descubrimiento. Becquerel demostró, a continuación, que una disolución de sal de uranio fosforescente era igualmente activa y constató que la

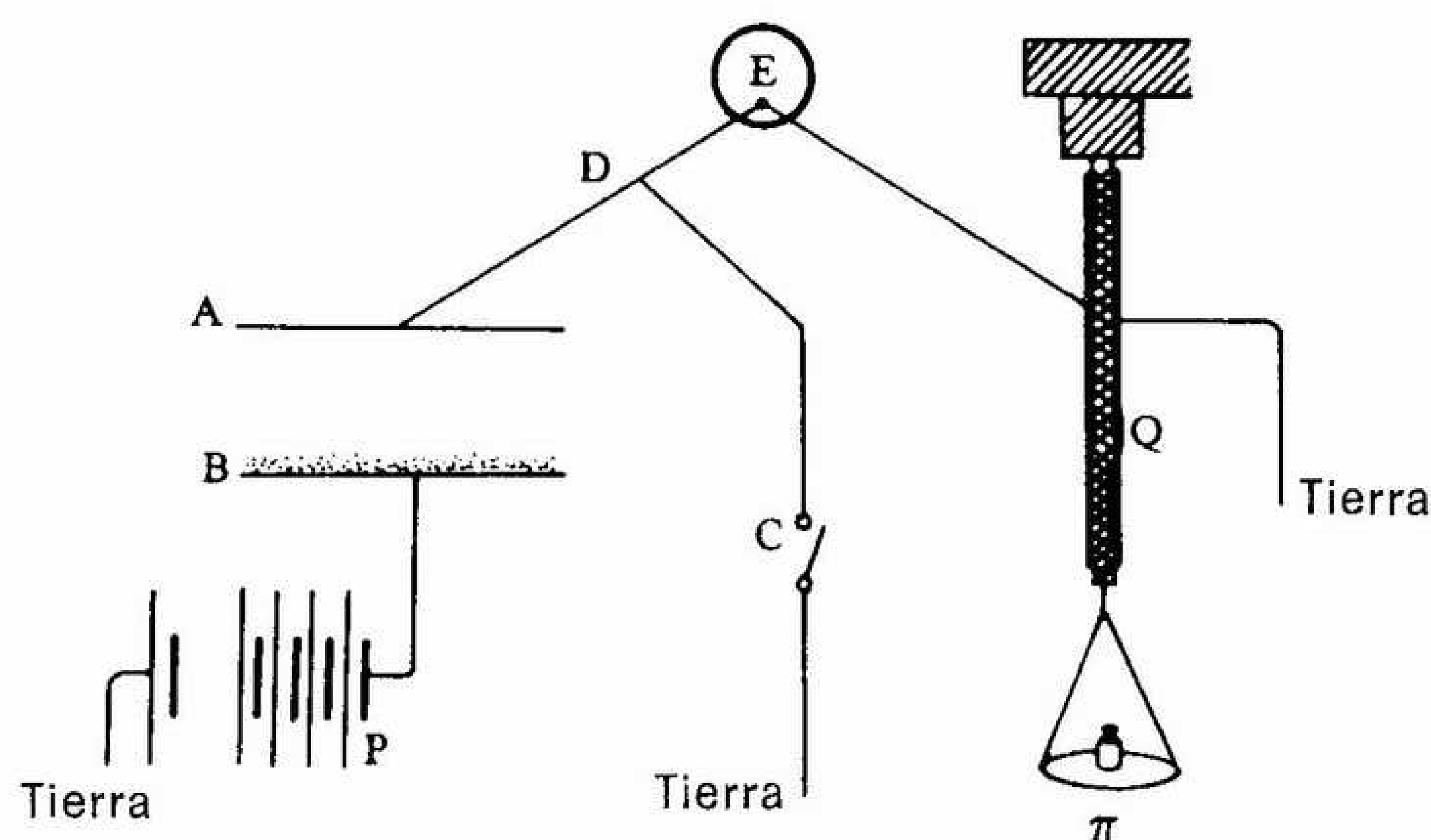
emisión de los «rayos uránicos» era una propiedad espontánea, atómica, del uranio, tanto en forma de metal puro como de compuesto, y tanto si había estado expuesto a la luz como si no.

A finales del año 1897, una joven, Marie Curie-Sklodowska, siguiendo los consejos de su marido Pierre Curie, emprendió el estudio sistemático de la radiación de Becquerel. Se puso a su disposición, para realizar las investigaciones, un laboratorio acristalado, en la planta baja de la Escuela de Física y Química Industriales de la ciudad de París.

Las nuevas radiaciones hacían que el aire pasara a ser conductor de la electricidad. Ese era un buen medio de estudiarlas cuantitativamente. Marie Curie utilizaría, a tal fin, un condensador de placas, llevado a cierto potencial eléctrico: cuando el aire entre las placas se hace conductor, permite el paso de cierta cantidad de corriente. Este aparato recibiría después el nombre de «cámara de ionización». La corriente eléctrica se mide en valor absoluto mediante un electrómetro y un cuarzo piezoeléctrico. El fenómeno de la piezoelectricidad había sido descubierto precisamente algunos años antes por Pierre Curie y su hermano Jacques: un cristal de cuarzo sometido a presión o tracción desprende una cierta cantidad de electricidad[1]. Ésta es susceptible de compensar, durante cierto tiempo, la electricidad producida en la cámara de ionización por el paso de las radiaciones de la sustancia radiactiva (véase figura).

Marie Curie decidió examinar un gran número de metales, sales, óxidos y minerales para ver si otras sustancias emitían radiaciones análogas a las del uranio. Constató en primer lugar que los compuestos de torio eran especialmente activos, y después, cuando introdujo en la placa inferior de su cámara dos minerales, la pechblenda, que contiene un óxido de uranio, y la chalcolita natural, que contiene un fosfato de cobre y de uranilo, observó que estos dos productos eran mucho más activos que el uranio solo. Este hecho notable la sorprendió y decidió fabricar una chalcolita de síntesis. Ésta no se reveló más activa que otra sal de uranio cualquiera. Marie Curie concluyó entonces con mucho acierto: «Este hecho conducía a pensar que esos minerales podían contener un elemento mucho más activo que el uranio.» Estos resultados parecían abrir un camino tan interesante que, abandonando los

[1] Este efecto se emplea hoy en las cápsulas de lectura de los giradiscos.



Montaje de la cámara de ionización (A-B), del electrómetro de cuadrantes (E) y del cuarzo piezoeléctrico (Q), utilizado por P. y M. Curie en sus experimentos.

trabajos que estaba realizando, Pierre Curie se unió a su mujer y «reunieron sus esfuerzos para llegar a la extracción de sustancias radiactivas nuevas y proseguir su estudio». Confirmaron que la gran radiactividad observada en los minerales provenía de elementos radiactivos nuevos, y pusieron a punto un nuevo método de separación de elementos imponderables. Procedieron a separaciones químicas y midieron la radiactividad de cada una de sus partes. El elemento desconocido estaba en la parte más activa. El método sería perfeccionado a continuación para caracterizar de una manera más precisa la radiación emitida (interposición de pantallas o empleo de un campo magnético, por ejemplo).

En julio de 1898, se produjo el descubrimiento de un nuevo elemento al que dieron el nombre de «polonio», por el del país de origen de Marie Curie. Y, en diciembre del mismo año, los dos jóvenes investigadores descubrieron el radio.

Por el conjunto de estos trabajos, Pierre y Marie Curie, junto con Henri Becquerel, fueron galardonados, en 1903, con el premio Nobel de Física.

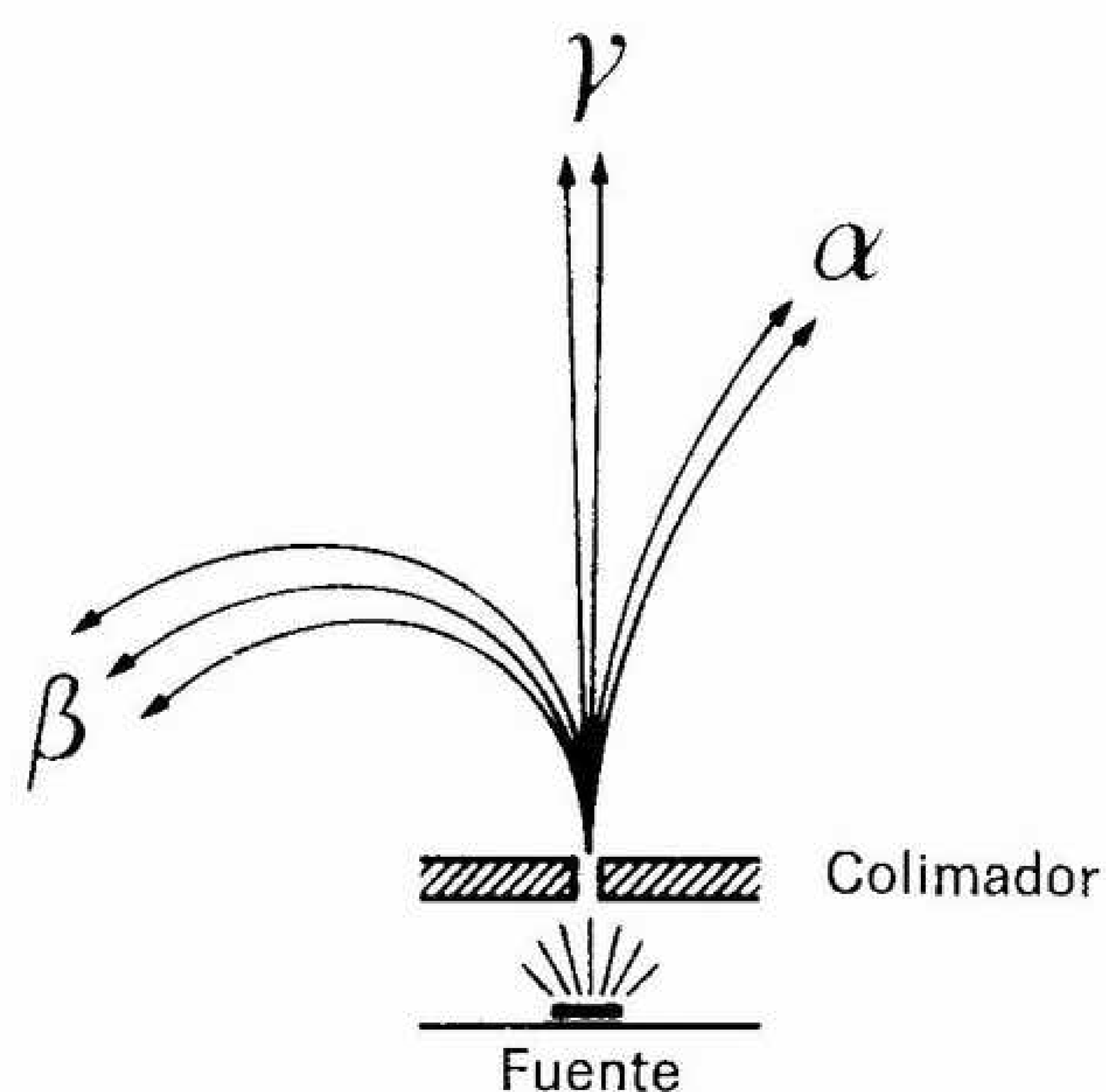
Los trabajos prosiguieron con tenacidad y entusiasmo para tratar de separar el radio en estado puro. Esto representó un trabajo considerable. Gracias a la Academia de Ciencias de Viena, Pierre y Marie Curie consiguieron varias toneladas de residuos de minerales de pechblenda procedentes de las minas de Joachimstahl, en Bohemia. La separación de las sales de radio fue especialmente larga y extenuante; pero, al fin, Marie Curie consiguió separar un decigramo de radio puro. Más adelante, después de la muerte accidental de Pierre Curie, logró separar un gramo de radio puro y consiguió asimismo determinar de una forma precisa su masa atómica. Por este trabajo, Marie Curie obtuvo, en 1911, un segundo premio Nobel, el de Química.

Las sales de radio brillaban en la oscuridad, las sustancias radiactivas concentradas desprendían calor, la radiación emitida espontáneamente transportaba energía. Así, Pierre Curie y A. Laborde pudieron mostrar que un gramo de radio era capaz, en una hora, de hacer fundir una cantidad de hielo superior a su propio peso. ¿De dónde provenía ese desprendimiento continuo de energía, que parecía inagotable y cuyo origen era misterioso? Científicos de muchos países, E. Rutherford, en Canadá y después en Gran Bretaña, y otros, en Alemania, en Francia, en Austria y en otros países de Europa, se lanzaron a la investigación para tratar de comprender la radiactividad.

Se les ofrecían tres orientaciones posibles: determinar las propiedades de los radioelementos y buscar otros nuevos, estudiar y medir sus radiaciones, investigar el origen de la emisión de esas radiaciones.

E. Rutherford mostró que las radiaciones observadas se comportaban de modo diverso en un campo magnético. Distinguió las partículas alfa, absorbibles en particular, cargadas positivamente, y que más adelante demostró que se trataba de núcleos de helio, y los rayos beta, cargados negativamente, y que mostraron ser electrones cuya velocidad era próxima a la de la luz.

Paul Villard demostró que un tercer tipo de radiación, la radiación gamma (γ), especialmente penetrante, no podía ser desviada por un campo magnético. Esta radiación demostró ser una radiación electromagnética de energía muy grande. Se descubrió toda una serie de nuevas sustancias radiactivas que podían aparecer y desaparecer en pocos días o en algunas horas. La radiactividad de ciertos cuerpos parecía ser constante, mientras que otros perdían su radiactividad. En 1900, en Montreal, Rutherford observó un efecto curioso, cuando estaba midiendo la intensidad de radiación de una fuente de torio, con una cámara de ionización de aire montada sobre un electroscopio. La intensidad no era la misma según que la puerta del laboratorio estuviera abierta o cerrada.



Los tres tipos de radiaciones α, β y γ, sometidos a la acción de un campo magnético.

Rutherford se dio cuenta de que el torio producía una «emanación», un gas radiactivo, que era aventado por la corriente de aire de la puerta abierta. Llamó a esta emanación torón[1] y mostró que su radiactividad disminuía a la mitad en menos de un minuto. Ésta fue la primera observación de decrecimiento exponencial de un radioelemento. El torón se transforma en un isótopo del polonio, que forma un «depósito activo».

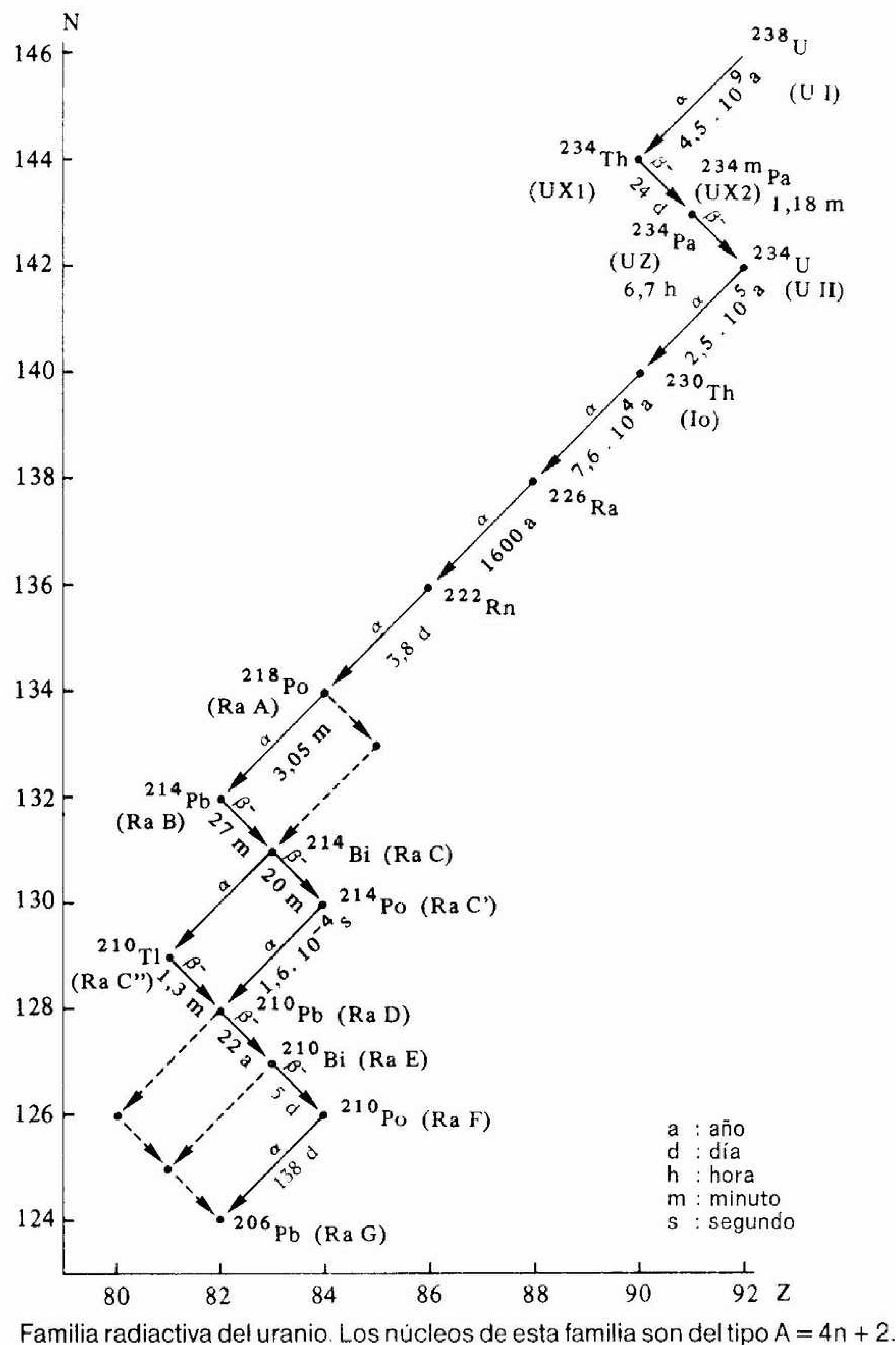
Estas propiedades eran extraordinarias. El conjunto de observaciones, que parecían tan complejas, fue por último ordenado y explicado por la teoría de las transformaciones radiactivas desarrollada por E. Rutherford y F. Soddy, en 1902, y por las leyes de desplazamiento (leyes de valencia) formuladas por Soddy, Fajans y Russell, en 1913-1914. Los átomos de los radioelementos (hoy decimos los núcleos) no son estables, sino que experimentan desintegraciones espontáneas y emiten una partícula alfa o bien una partícula beta. Después de la desintegración, el átomo resultante tiene propiedades físicas y químicas distintas por completo de las del átomo de origen. Este átomo nuevo puede, a su vez, ser

[1] El torón es un isótopo del radón, el más pesado de los gases nobles.

inestable, y dar así lugar a una sucesión de transformaciones de un elemento en otro, cada una de ellas acompañada de una radiación alfa o de una radiación beta. El conjunto de núcleos obtenidos en la serie de transformaciones radiactivas correspondientes a un mismo núcleo original se denomina «familia radiactiva». La emisión no es instantánea, sino que tiene lugar con una vida media o período determinado (véase recuadro, capítulo 2, página 15). Una transformación alfa (emisión de un núcleo de helio por el núcleo radiactivo), corresponde a una disminución del número de masa del núcleo en cuatro unidades, y de su número atómico en dos unidades. La emisión beta menos no cambia el número de masa del núcleo sino que aumenta su estado de carga y, por tanto, su número atómico en una unidad. El núcleo resultante se sitúa una casilla más adelante en la clasificación de Mendeleiev.

Se observaron tres familias radiactivas, que descendían respectivamente del uranio 238, del torio y del uranio 235. Así, como puede verse en la figura de la página siguiente, la familia que comprende el radio proviene del uranio 238. Damos aquí el ejemplo de una familia radiactiva, la del radio, que procede del uranio 238, de $4{,}5 \cdot 10^9$ años de período, y que por tanto subsiste en la naturaleza desde la época de su formación. Dentro de una familia radiactiva, se pueden encontrar radioelementos de vida muy corta, cuyos núcleos se desintegran al poco tiempo de haberse formado. Cabe señalar, por ejemplo, que el radio $^{226}_{88}Ra$, cuyo período es de 1.600 años, se desintegra, por emisión alfa, en un gas, el radón, $^{222}_{86}Rn$ (isótopo del torón). Obsérvese que el Ra E (isótopo del bismuto) se transforma por emisión beta —con un período de 5 días— en polonio ($^{210}_{84}Po$), el cual, por emisión de un alfa, dará al final de la cadena un isótopo estable del plomo. Veremos a continuación que una transformación radiactiva sólo puede tener lugar cuando la masa total del sistema final (núcleo resultante más las partículas emitidas) es más pequeña que la masa del sistema inicial (núcleo de partida). Se produce así un aumento de estabilidad al pasar al sistema final; la diferencia de masa aparece en forma de energía cinética del núcleo de retroceso y de las partículas emitidas (véase el principio de equivalencia de Einstein en el capítulo 2). El lector se preguntará por qué esta transformación es unas veces rápida y otras lenta; veremos las razones un poco más adelante.

En el transcurso de este período, se desarrollaron grandes esfuerzos en diversos laboratorios para conocer la composición completa de las familias radiactivas y comprender todas las filiacio-



Familia radiactiva del uranio. Los núcleos de esta familia son del tipo A = 4n + 2.

nes. Durante estos trabajos se descubrieron varios radioelementos nuevos por investigadores de diferentes países, entre ellos André Debierne, R. B. Boltwood, Otto Hahn y Lise Meitner. Algunos de estos radioelementos correspondían a tipos químicos nuevos (actinio, protactinio); otros, en cambio, estaban vinculados a tipos químicos ya conocidos anteriormente y de los cuales poseían todas las propiedades. Se advirtió así que diversos radioelementos, que se podían distinguir tanto por su filiación como por su período de desintegración y sus radiaciones, pertenecían, de hecho, al mismo elemento químico de la clasificación de Mendeleiev. Frédérick Soddy, el primero en deducir todas las consecuencias de esta constatación, los denominó isótopos.

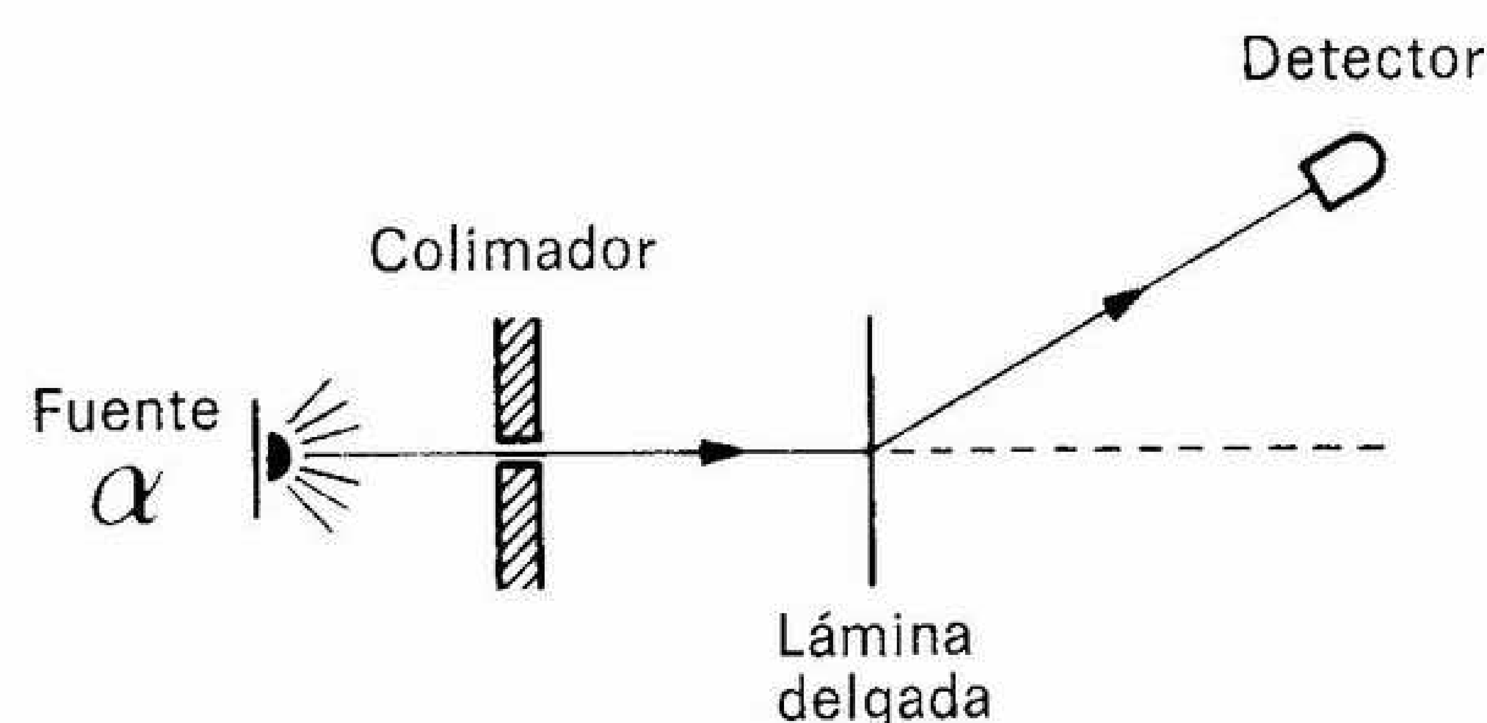
A continuación, se constató que la isotopía no era exclusiva de los radioelementos, cuyo número atómico estaba entre 81 y 92. J. J. Thomson, al emplear de manera simultánea un campo eléctrico y un campo magnético para derivar un haz de átomos ionizados, observó, en 1912, dos rayas para los átomos del gas neón. F. W. Aston confirmó, en 1920, mediante la utilización del primer espectrógrafo de masas, que en la naturaleza existían dos átomos de neón estables que tenían el mismo número atómico 10, pero números de masa diferentes, 20 y 22 respectivamente. Se demostró, por último, que la mayor parte de los elementos químicos de la naturaleza (aunque no todos) están constituidos por diversos isótopos estables. H. Urey descubrió en 1932, que incluso el hidrógeno comprendía un isótopo pesado, al que se dio el nombre de deuterio, de masa 2.

En el transcurso de los años, se descubrieron también algunos isótopos radiactivos naturales, de períodos muy largos, y que no pertenecían a las grandes familias radiactivas. Estos radioisótopos —como el potasio 40 (período: $1{,}28 \cdot 10^{9}$ años), el rubidio 87 (período: $4{,}8 \cdot 10^{10}$ años) el samario 147 (período: $1{,}1 \cdot 10^{11}$ años) o el renio 187 (período: $5 \cdot 10^{10}$ años)— subsisten en la naturaleza desde el período en el cual tuvo lugar la formación del Sistema Solar.

2. NÚCLEO, TRANSMUTACIONES Y REACCIONES NUCLEARES

Hasta 1911, el átomo se imaginaba como una esfera con una distribución uniforme de carga positiva y que contenía asimismo,

repartidos en todo su volumen, unos electrones de carga negativa. Muy pronto, las partículas alfa de alta energía emitidas por diferentes radioelementos se utilizaron como proyectiles con los cuales se podía explorar la materia; trabajando, por lo general, en vacío, se disponía una fuente de partículas alfa seguida de un colimador, que sólo dejaba pasar un haz fino de estas partículas, y a continuación se situaba una lámina del metal que se quería estudiar. El choque con los átomos que constituían el metal provocaba desviaciones de las partículas alfa. Estas desviaciones se debían al efecto de las cargas eléctricas del átomo sobre la carga eléctrica positiva de la partícula alfa. Se suponía que el ángulo de desviación debería ser pequeño. Ahora bien, unos experimentos realizados por Geiger y Marsden, en 1909, demostraron que, de cuando en cuando, una partícula alfa rebotaba hacia atrás, experimentaba por tanto una desviación de más de 90°. Observaron, por ejemplo, que aproximadamente una partícula alfa incidente de cada 20.000 era desviada por término medio 90°, al pasar a través de una lámina de oro de 4/10 micras de espesor. El fenómeno era tanto más importante cuanto más elevado era el peso atómico del elemento que constituía la hoja metálica.



Los átomos —y sus núcleos— de una lámina delgada se estudian por medio de la difusión de los rayos α emitidos por una fuente radiactiva. Los experimentos de Geiger y Marsden se realizaron de esta manera, y utilizaron como detector una pantalla de centelleo.

E. Rutherford, en Manchester, calculó que, si la carga eléctrica (positiva o negativa) estaba repartida de manera uniforme en el volumen del átomo, el ángulo de desviación sólo podía ser relativamente pequeño; al analizar los resultados de Geiger y Marsden, señaló que las desviaciones excepcionales sólo podían explicarse si se suponía que la carga positiva del átomo estaba concentrada en un volumen central muy pequeño, que denominó núcleo; los electrones estarían entonces distribuidos en el conjunto del volumen del átomo. Ésta fue la primera descripción moderna del átomo y de su núcleo central. La experiencia de Rutherford fue el primer ejemplo de un tipo de estudio especialmente fructífero: el análisis de la estructura microscópica de la materia mediante bombardeo con partículas de alta energía. La medida de las desviaciones de estas partículas, de su distribución en función del ángulo y de la intensidad relativa de estas desviaciones, nos proporciona datos sobre la dimensión de los microobjetos y acerca de la interacción que está en juego. Cuanto más pequeño es el microobjeto a estudiar, tanto mayor habrá de ser la energía de las partículas que se utilicen.

Entre 1911 y el inicio de la Primera Guerra Mundial, se sucedieron con rapidez una serie de experiencias y explicaciones fundamentales. Los notables trabajos del joven ayudante de Rutherford, H. G. J. Moseley, muerto prematuramente, en 1915, en la batalla de los Dardanelos, revelaron experimentalmente, en 1913, mediante el estudio de los espectros de rayos X, que el número atómico de la clasificación de Mendeleiev correspondía al número de electrones del átomo, lo cual había sido sugerido poco antes por Van den Broek.

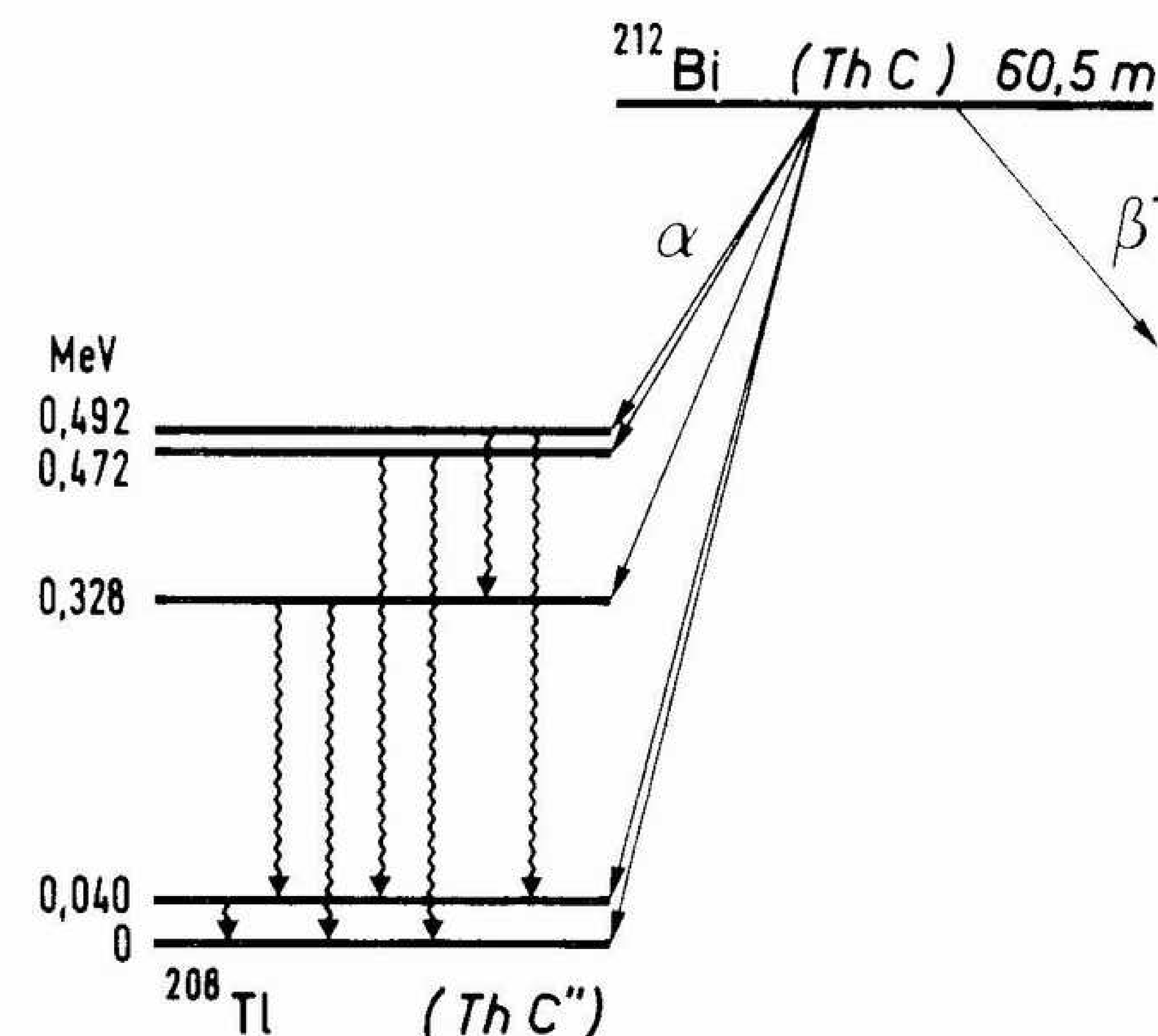
La primera teoría del átomo fue elaborada, en 1913, por Niels Bohr, que trabajó en Copenhague y en Manchester. Según esta teoría, los electrones gravitan en torno del núcleo central a distancias más o menos grandes, de acuerdo con ciertos tipos de movimientos que corresponden a estados de energía y números cuánticos bien definidos. Dado que la mecánica clásica no podía explicar el movimiento de los electrones, N. Bohr pensó que las ideas de Planck acerca de la cuantificación debían introducirse en su modelo «planetario» del átomo. El átomo emite y absorbe fotones de frecuencia bien definida, que representan «granos» (cuantos) de una energía determinada. Esta emisión o absorción debía corresponder al salto de un electrón de un estado estacionario a otro. Bohr imaginó que sólo los movimientos orbitales correspondientes a un número entero de múltiplos de $h/2\pi$ estaban permitidos a los electrones que giraban en un estado estacionario. Después de la guerra de 1914-1918, una serie de notables trabajos teóricos, que

partían del modelo del átomo de Bohr, condujeron a la elaboración de la mecánica cuántica.

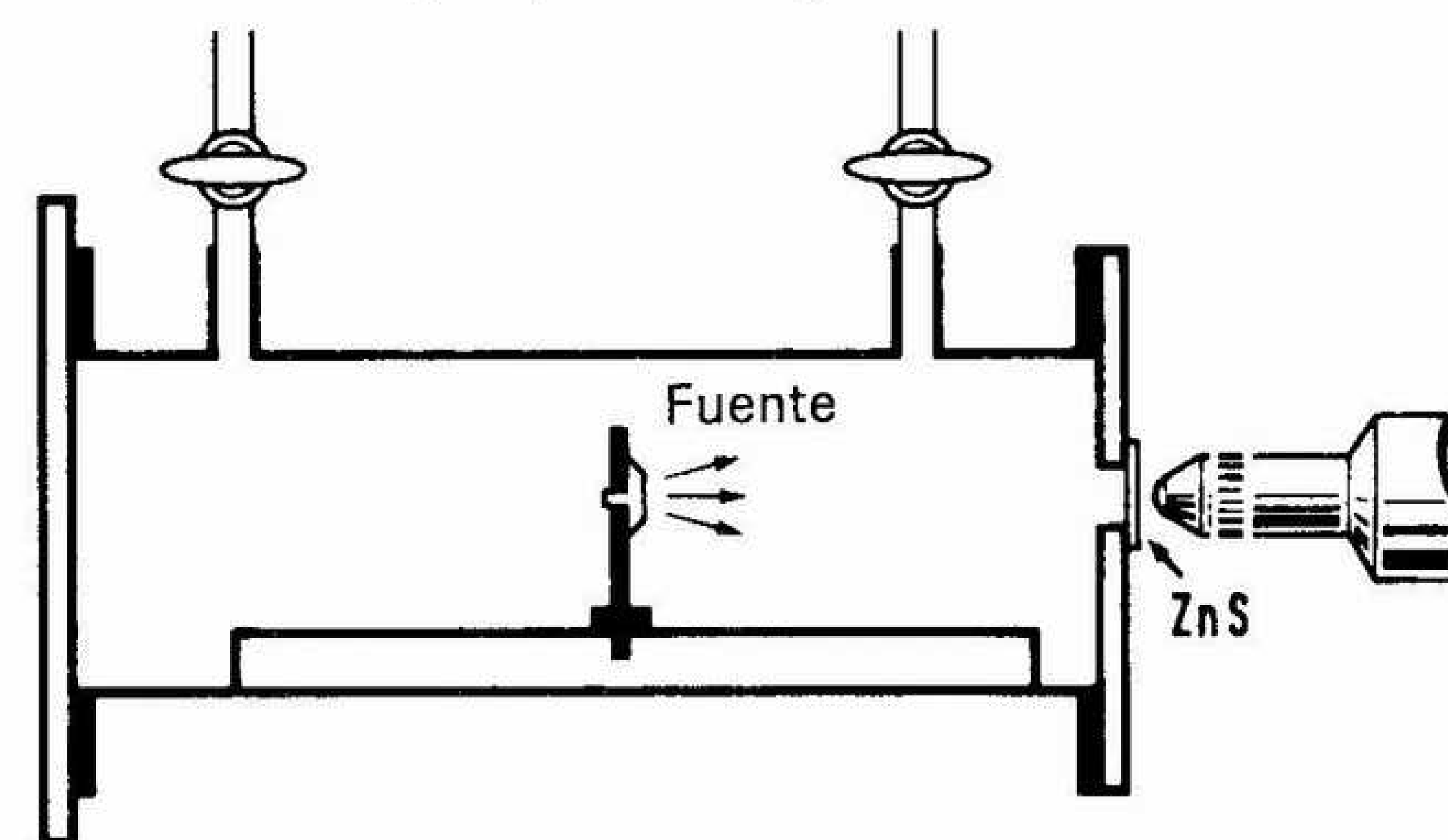
El salto de un electrón atómico de una capa externa a una capa interna (siempre que haya un sitio libre) libera energía, que es emitida en forma de una raya X característica, que puede observarse en ocasión del efecto fotoeléctrico o la desintegración radiactiva de ciertos núcleos. En cuanto a la radiación gamma, ésta tiene una energía mayor, que representa la diferencia de energía entre dos estados diferentes de excitación del propio núcleo. Cada uno de estos estados corresponde a un determinado movimiento interno *en el núcleo*. Cuando un núcleo pasa desde un estado de movimiento interno a otro, se produce la emisión de una radiación gamma de energía bien definida. S. Rosenblum, del Instituto del Radio, mediante el empleo del gran electroimán construido por A. Cotton para curvar las trayectorias de las partículas alfa y analizar su espectro, descubrirá, en 1929, una estructura fina en energía de los rayos alfa del torio C (^{212}Bi), que corresponden a diferentes niveles de energía del núcleo resultante de la desintegración, ^{208}Tl. Éste será otro procedimiento para determinar el esquema de estos niveles.

Volvamos a Manchester, a principios de 1919, donde Rutherford prosigue sus experimentos. Emplea una pantalla recubierta con sulfuro de cinc, para observar los centelleos debidos al impacto de las partículas alfa emitidas por una fuente de radio C. Cada partícula alfa que incide sobre la pantalla da lugar a un centelleo, visible a simple vista en la oscuridad. Este método lo habían ideado, en 1903, Crookes, Elster y Geitel. La interposición de pantallas metálicas permite impedir que las partículas alfa lleguen al sulfuro de cinc: ahora bien, cuando se introduce aire entre la fuente y la pantalla, Rutherford observa que el número de destellos, en lugar de disminuir, aumenta. Al examinar con más atención este fenómeno, Rutherford llega a la conclusión de que, al pasar a través del nitrógeno del aire, una partícula alfa de cada millón da lugar a una reacción nuclear con emisión de un protón, cuyo recorrido es notablemente mayor que el de la partícula alfa, y considera que se trata de la desintegración del nitrógeno. Algunos años más tarde, P. Blackett, empleando una cámara de Wilson, pudo fotografiar el fenómeno; en sus clichés aparecían la partícula alfa incidente y el protón proyectado, pero sólo estaba asociado a ellos un trazo corto y grueso, que daba a la desintegración el aspecto de una horquilla. A partir de estas fotografías tomadas en la cámara de niebla, se





Niveles de excitación del núcleo de Th C" (^{208}Tl) alcanzados por desintegración α del núcleo de Th C (^{212}Bi). Se distingue la estructura fina de los rayos α.



Aparato utilizado por Rutherford, en 1919, para visualizar la transmutación de los núcleos de nitrógeno (que estaban en el interior de la cámara) por los rayos α de una fuente radiactiva. El impacto de los protones de transmutación, cuyo recorrido es más largo que el de las partículas α, se observa, gracias a los centelleos inducidos en una pantalla de sulfuro de cinc, con la ayuda de un microscopio (a la derecha de la figura).



2. LA CÁMARA DE WILSON

La cámara de niebla de Wilson es un aparato de detección de radiaciones, calificado en su tiempo de «el más bello instrumento de la física». Gracias a ella se han realizado descubrimientos de primera importancia, hasta principios de los años cincuenta.

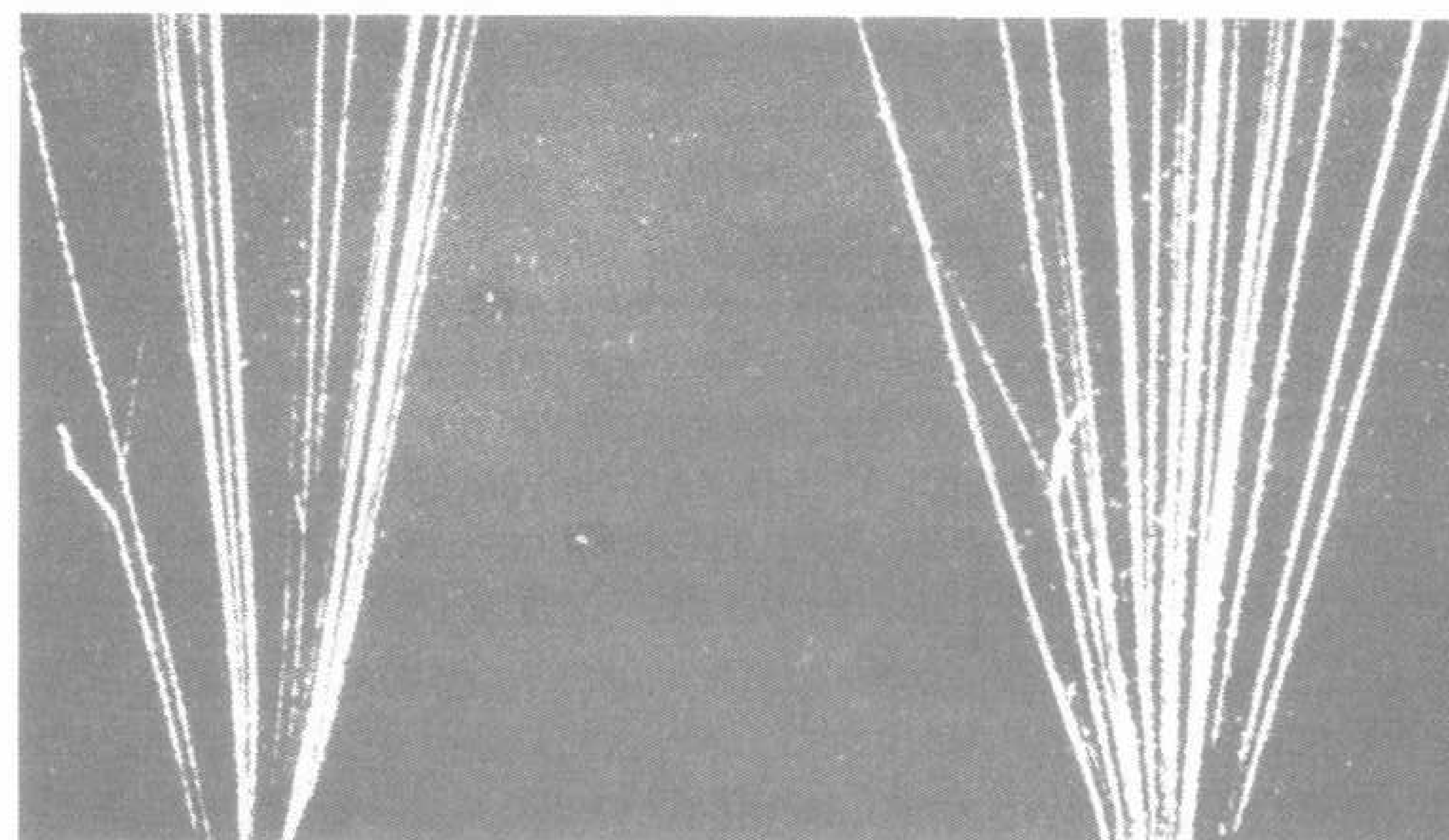
En septiembre de 1894, el físico escocés C. T. R. Wilson escalaba el Ben Nevis, la montaña más alta de Escocia. En ese país, donde las nieblas son frecuentes, Wilson pudo admirar desde la cumbre los reflejos irisados del sol sobre las múltiples gotitas de niebla; se propuso reconstruir la niebla en el laboratorio, y estudiar las condiciones de su formación. Empezó con un montaje simple, después construyó una cámara de expansión provista de un émbolo, llena de aire y de vapor de agua saturante (véase página 34). La expansión, al aumentar bruscamente el volumen de la cámara, provoca una disminución de la temperatura y la condensación del vapor de agua en forma de gotitas de niebla. Wilson observó después que, en ciertos límites de expansión, las gotitas se formaban en primer lugar sobre el polvo del aire; después, cuando se limpiaba el aire de polvo, sobre todas las partículas electrizadas, todos los iones formados en la cámara. Ahora bien, toda partícula cargada de gran velocidad, tanto si es un electrón como una partícula α o un protón, ioniza el gas que atraviesa, es decir, crea a lo largo de su recorrido cierto número de pares de iones; las gotitas se forman sobre estos iones, y así se obtiene una materialización de las trayectorias de las partículas cargadas visibles a simple vista, que se pueden fotografiar (véanse figuras pág. 33). En la primavera de 1911, Wilson pudo ver así, por primera vez, trayectorias de

(Continúa en pág. 34)

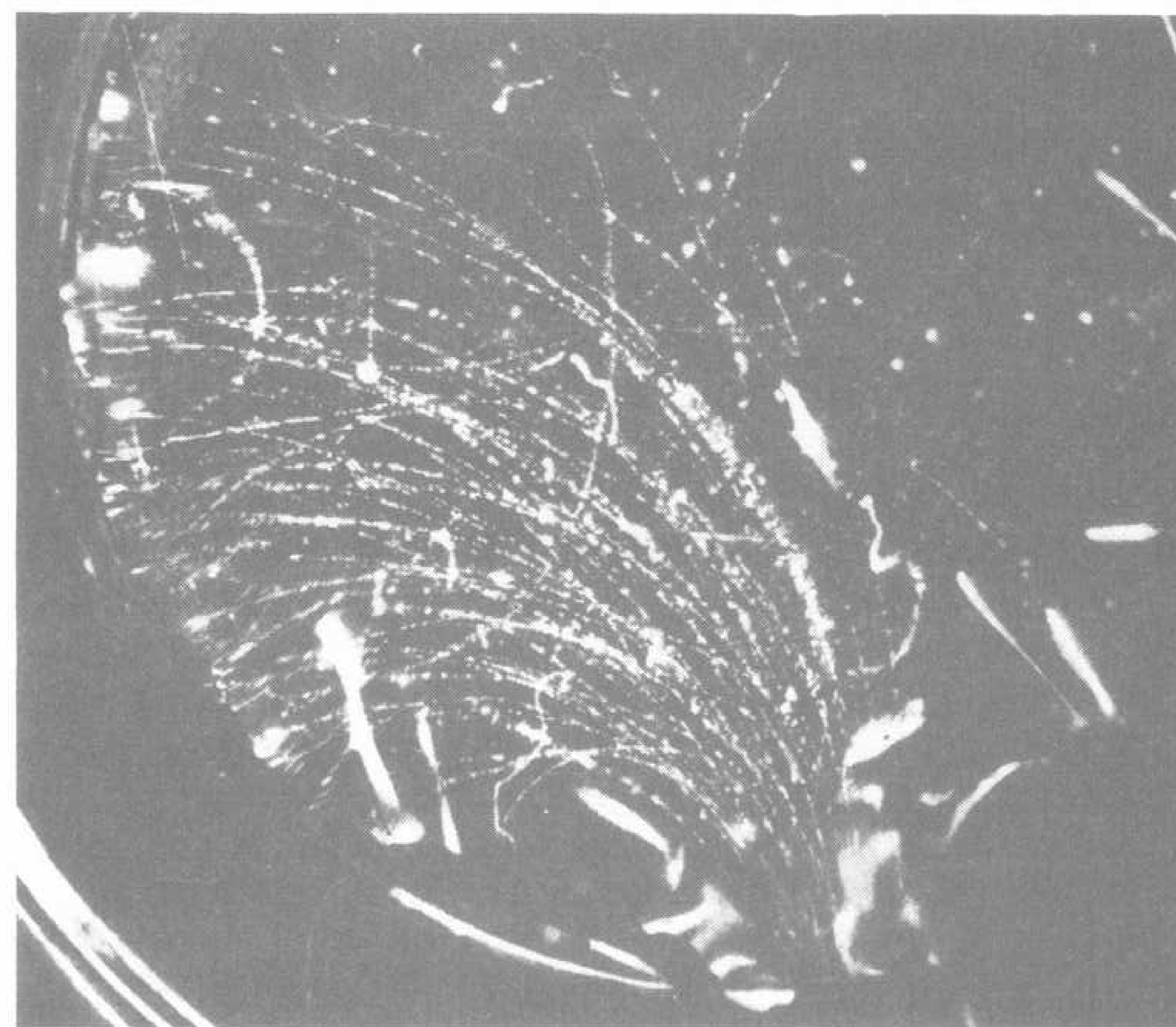
a. Cliché de cámara de Wilson correspondiente a una transmutación de un núcleo de nitrógeno (Blackett). Se distinguen las trayectorias de las partículas α, que llegan de la parte inferior. Una de ellas se bifurca: la trayectoria más larga corresponde al protón emitido, la trayectoria más corta, al núcleo en retroceso del oxígeno 17. Las partículas pesadas (α, protones, etc.) son muy ionizantes y sus trayectorias son típicamente rectilíneas; raras veces experimentan grandes desviaciones, y son densas (no se distinguen las gotitas individuales).

b. Cliché de cámara de Wilson correspondiente a trayectorias de rayos β emitidos por una fuente de radio E (M. Lecoin). Estas trayectorias pueden curvarse con relativa facilidad por un campo magnético. Los rayos β pueden experimentar desviaciones importantes y son relativamente poco ionizantes; sus trayectorias son, por tanto, finas (se distinguen, en general, las gotitas individuales de niebla).

a

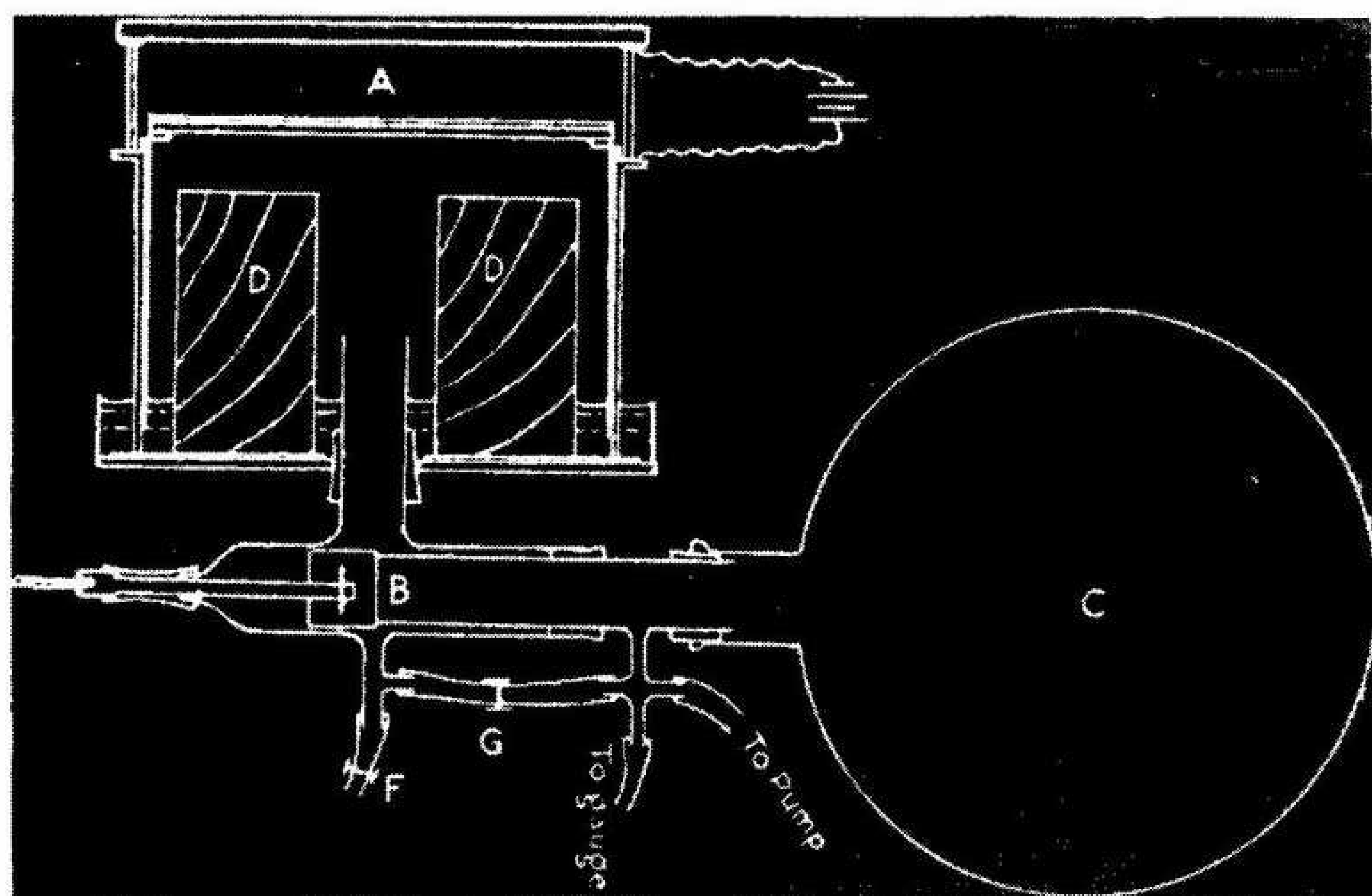


b



electrones en su cámara, atravesada por un haz de rayos X que arrancaban electrones a su paso. Lanzó una exclamación de alegría, y todos los investigadores posteriores hicieron otro tanto, cuando tuvieron el placer de ver por primera vez una expansión de la cámara de Wilson.

La cámara puede situarse en un campo magnético que curva las trayectorias de las partículas cargadas, lo que permite la medición de su impulso. En las cámaras de niebla, se han utilizado un gran número de gases diferentes, a diversas presiones. Estas cámaras se reemplazaron más tarde por las cámaras de burbujas, inventadas por Glaser, en 1952, para el estudio de partículas elementales. En estas cámaras, las trayectorias de las partículas ionizantes se materializan en forma de burbujas dentro de un líquido (en general, un gas licuado, a baja temperatura).



c. Esquema de la primera cámara de C. T. R. Wilson. La cámara propiamente dicha está en A. Se ilumina lateralmente y se fotografía por encima. El recorrido del émbolo está limitado por los bloques D. Para provocar la caída del émbolo, se ponen bruscamente en comunicación el volumen libre que existe debajo del émbolo con el depósito C, donde previamente se ha hecho el vacío.

podía deducir que un núcleo de nitrógeno bombardeado por una partícula alfa se transforma en un protón y un núcleo de oxígeno 17 (isótopo raro y estable del oxígeno).

Puede escribirse:



$$^{14}_{7}N + \alpha \rightarrow ^{17}_{8}O + p \qquad (1)$$

Para que se produjera una reacción así, era preciso que la partícula alfa coincidiera en su camino con el pequeño núcleo de nitrógeno y penetrara en su interior, de ahí la rareza del fenómeno. Éste fue el primer ejemplo de transmutación comprobada experimentalmente, la realización del viejo sueño de los alquimistas de la Edad Media: transformar un elemento en otro elemento. Desde los experimentos de Rutherford y de Blackett, se han realizado otras muchas transmutaciones nucleares. Hoy se puede transformar, por ejemplo, un núcleo de carbono en nitrógeno, un núcleo de cobre en núcleo de níquel, un núcleo de argón en potasio, e incluso un núcleo de plomo en núcleo de oro, mediante una reacción llamada de espalación[1]. Pero digamos de inmediato que el precio del oro así obtenido es mucho más elevado que el del oro natural.

Se ha observado un gran número de reacciones nucleares análogas. Todas ellas pueden caracterizarse por lo que se denomina un balance de reacción. Como hemos visto, según la relación de Einstein, la masa y la energía son equivalentes. Una masa puede escribirse sea en unidades de energía, sea en unidades de masa atómica (u.m.a.). De este modo, para una reacción como la que se ha indicado más arriba (1), puede calcularse la energía total en su estado inicial (la energía correspondiente a las masas del núcleo de nitrógeno y del núcleo de helio, más la energía cinética del proyectil helio), y ésta debe ser igual a la energía total en el estado final (las energías correspondientes a las masas del núcleo de ^{17}O y del protón, más las energías de retroceso del núcleo ^{17}O y del protón al final de la reacción). Esta igualdad traduce la conservación global de la masa y de la energía; una masa dada puede transformarse en energía, y viceversa. La energía cinética liberada en la reacción puede ser mayor que la que tenía el proyectil a la salida. En este

[1] Una reacción de espalación es una reacción provocada por partículas de gran energía, en la cual se emiten varios protones, neutrones o núcleos muy ligeros.

3. NOTACIÓN DE UNA REACCIÓN NUCLEAR

En vez de la notación empleada arriba ($^{14}N+\alpha \rightarrow {}^{17}O+p$), se emplea a menudo la escritura abreviada $^{14}N\ (\alpha,p)^{17}O$. Se indica así que ^{14}N es el núcleo-blanco, ^{17}O el núcleo de retroceso, que el proyectil es una partícula α (núcleo de $^{4}_{2}He$) y que la partícula emitida observada es un protón. El símbolo químico da por sí mismo el número atómico Z. En el ámbito de las reacciones entre núcleos muy ligeros y en el ámbito de partículas elementales, se utiliza hoy una notación aún más abreviada; así, por ejemplo, la reacción:



$$p + p \rightarrow {}^{2}H + \pi^{+}$$

puede escribirse:



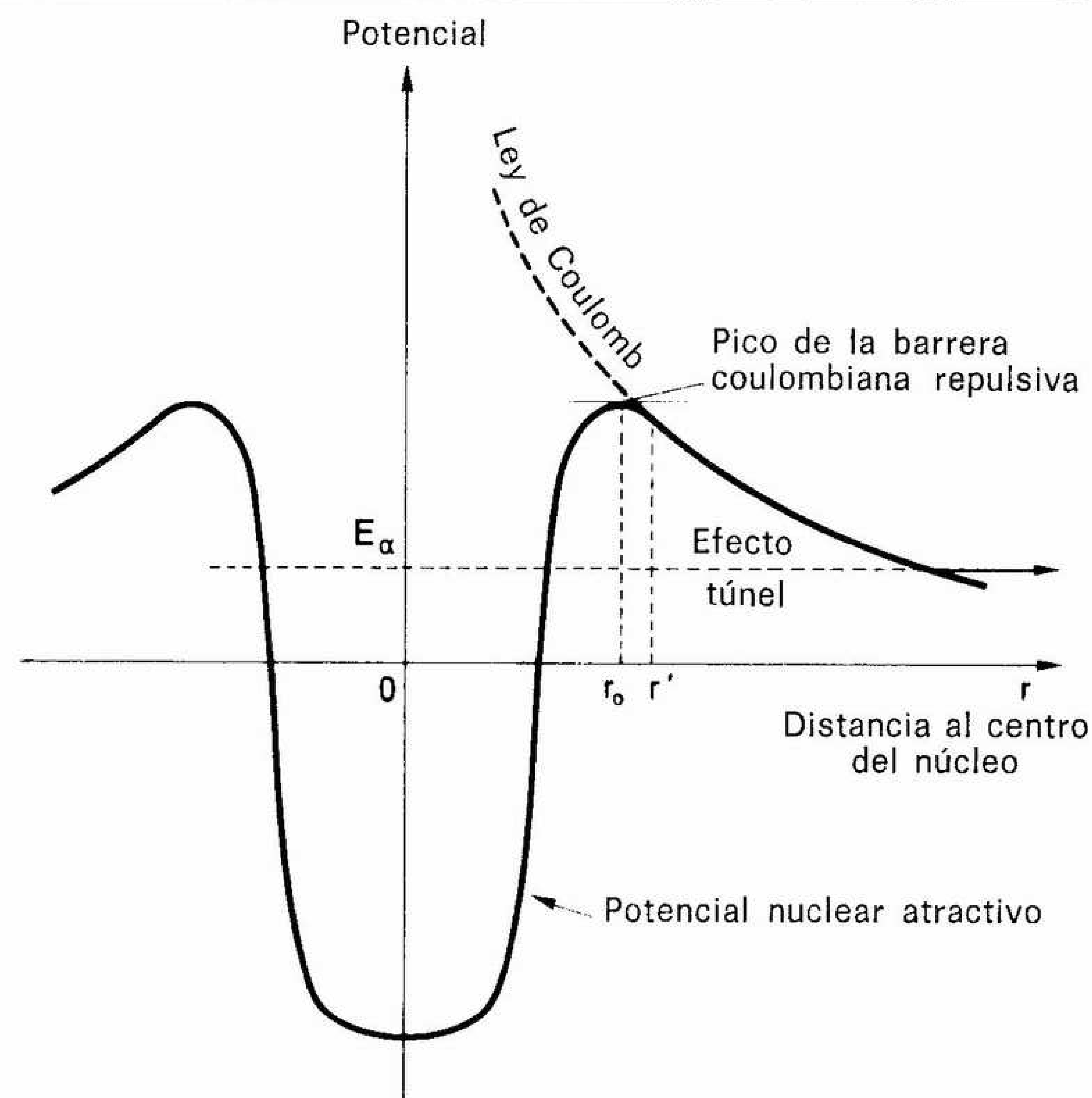
$$pp \rightarrow d\pi^{+}$$

Notación habitual de los núcleos muy ligeros: el núcleo de hidrógeno, ^{1}H, se escribe p; el núcleo de deuterio, ^{2}H, llamado deuterón, se escribe d; el de tritio, ^{3}H, se escribe t; el de helio 3, ^{3}He, se escribe τ; el núcleo de helio 4, ^{4}He, es la partícula α.

caso, puede imaginarse que, incluso en el caso de una energía de proyectil nula, la reacción puede producirse con liberación de energía. De modo inverso, en ciertas reacciones, es preciso que la energía incidente sobrepase cierto umbral para que tengan lugar las reacciones. La energía liberada es fruto de la acción de las fuerzas nucleares en el interior del núcleo.

3. EFECTO TÚNEL A TRAVÉS DE LA BARRERA DE POTENCIAL DEL NÚCLEO

A lo largo de los años, los físicos se habían preguntado de qué manera podían salir del núcleo las partículas alfa, cuál era la ley que relacionaba su energía con el período de desintegración, de dónde procedía esta ley de decrecimiento exponencial de las sustancias radiactivas. ¿Cómo relacionar las propiedades de la emisión de partículas alfa con lo que se podía conocer de la dimensión de los núcleos a partir de experimentos como los de Rutherford? La dificultad era considerable. Una partícula alfa, de carga positiva es repelida por el núcleo, también de carga positiva, según la ley de Coulomb representada por la curva discontinua de la figura de la página 37. Por debajo de cierta distancia desde el centro del núcleo, las fuerzas nucleares empiezan a tener un importante papel. Estas fuerzas son, como ya se ha dicho, muy fuertes, atractivas, y de corto radio de acción. Su efecto se hace sentir hacia el interior, a partir de un radio r′. Puede verse en la figura que la acción conjunta de las fuerzas eléctricas (de Coulomb) y de las fuerzas nucleares toma la forma de una «barrera de potencial». Si se forma una partícula alfa en el interior del núcleo, con una energía correspondiente a la que se observa en la radiactividad alfa, esta partícula se encuentra, en apariencia, atrapada por la barrera



Partícula α emitida por un núcleo con una energía E_α. Acaba de atravesar, por el efecto túnel, la barrera de potencial coulombiano, repulsiva, que la retenía en el interior del núcleo. El efecto de las fuerzas nucleares atractivas se hace sentir hasta un radio r′.

de potencial, y debería permanecer indefinidamente en el interior del núcleo.

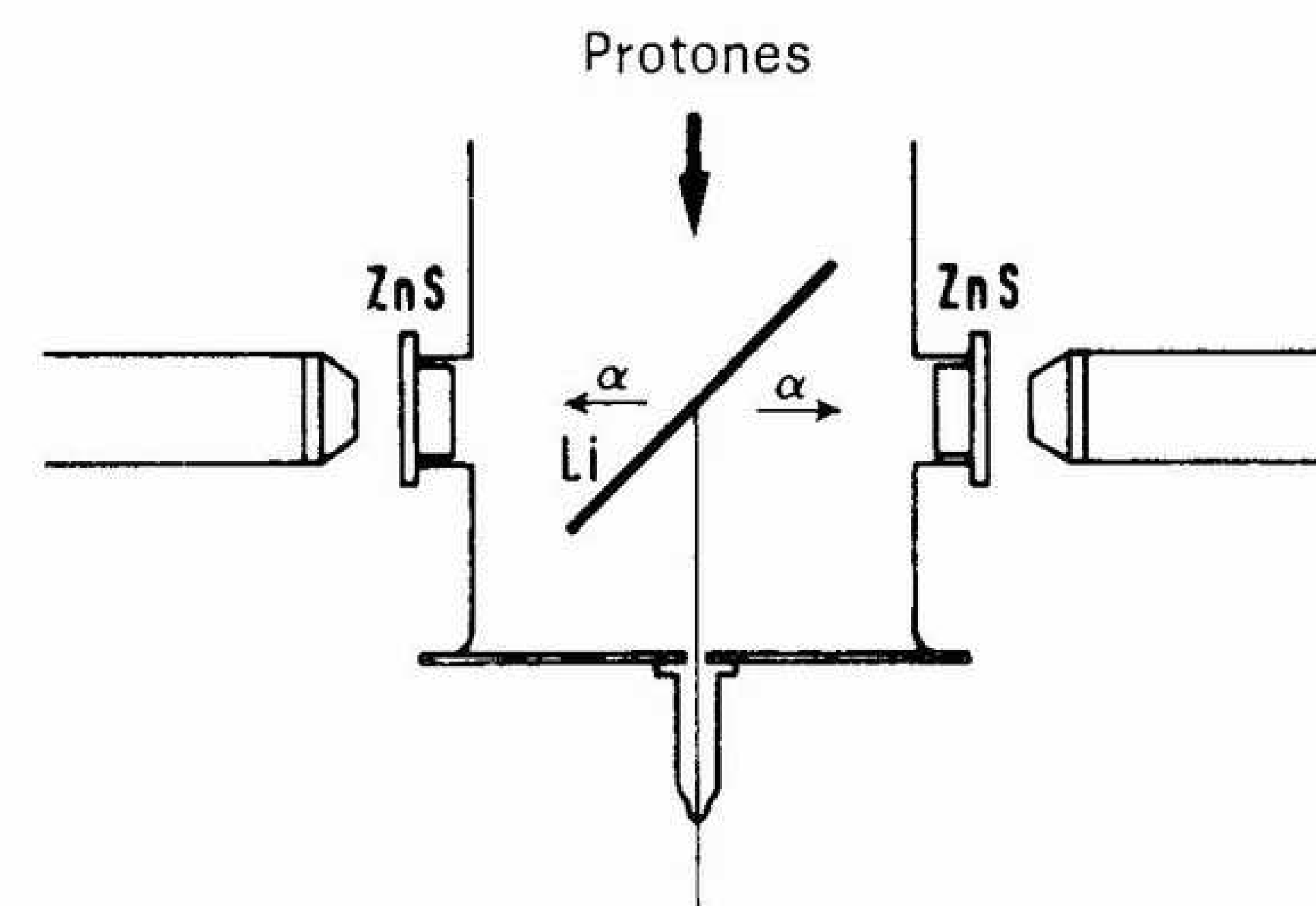
Diferentes físicos, en los años 20, trataron de formular hipótesis, poco verosímiles, para hacer frente a esta dificultad. Fueron Gamow e independientemente de éste Condon y Gurney quienes, en 1928, encontraron la solución, gracias a la recién inventada mecánica cuántica. Para ésta, una barrera de potencial no era infranqueable. Existía siempre una cierta probabilidad —a veces muy pequeña— de que una partícula alfa atravesara la barrera por efecto túnel, y esta probabilidad de atravesarla dependía simplemente de la energía relativa de la partícula alfa con respecto a la parte más alta de la barrera.

La aplicación de las ecuaciones de la mecánica cuántica conducía de manera natural a la ley que relacionaba la energía de las partículas alfa con la vida media del núcleo emisor.

4. LOS PRIMEROS ACELERADORES DE PARTÍCULAS

Los pioneros de la física nuclear, y en especial Rutherford, advirtieron muy pronto el interés que tendría la obtención de partículas aceleradas de modo artificial. Como ya hemos visto, Rutherford realizó sus principales descubrimientos con las partículas alfa de los radioelementos naturales. Fueron los mismos proyectiles utilizados a continuación por J. Chadwick y F. e I. Joliot-Curie. Las intensidades de las partículas estaban limitadas por las fuentes radiactivas que podían prepararse, y la energía de que se podía disponer era la determinada por la naturaleza. Obtener artificialmente intensidades mayores no parecía difícil. Un haz de un microamperio correspondía a $6 \cdot 10^{12}$ cargas elementales por segundo, mientras que 100 g de radio (100 curies) emitían $3{,}7 \cdot 10^{12}$ partículas alfa, por tanto $7{,}4 \cdot 10^{12}$ cargas a todo el espacio. Obtener energías mayores que las de las partículas alfa pareció al principio relativamente difícil. Se requerían, en principio, unas tensiones aceleradoras de varios millones de voltios. Pero pronto se encontraron ingeniosos procedimientos para soslayar esta dificultad.

Wideröe, en 1928-1929, empleó, por una parte, electrones que circulaban en el interior de un campo magnético variable, y, por otra, recurrió por primera vez a las aceleraciones múltiples, mediante una misma tensión periódica (campo eléctrico de alta frecuencia) aplicada sucesivamente a una serie de cilindros colocados



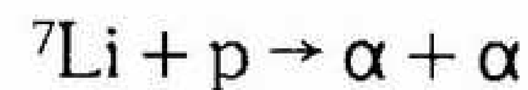
Experimento de Cockroft y Walton (primera reacción nuclear artificial). El haz de protones acelerados, que proviene de la parte superior, choca contra un blanco de litio. Las dos partículas α producidas en la reacción se observan simultáneamente gracias a dos pantallas de sulfuro de cinc y dos microscopios.

en línea uno detrás de otro. Esto representó el primer ensayo de acelerador lineal de iones pesados.

C. C. Lauritsen, en 1928-1930, utilizó, en Estados Unidos, una serie de transformadores en cascada. Van de Graaff, en 1931-1932, construyó el primer acelerador electrostático en el cual una esfera metálica hueca se cargaba eléctricamente mediante una correa en movimiento.

En el laboratorio de Rutherford, E. T. S. Walton estudió dispositivos análogos. En enero de 1929, G. Gamow fue a Cambridge y explicó su teoría del efecto túnel a través de la barrera de potencial del núcleo. J. D. Cockroft, que asistía a la conferencia, advirtió de inmediato que se podía aplicar la teoría a la inversa y que la penetración de un núcleo, mediante partículas alfa o protones acelerados artificialmente, se volvía así mucho más fácil de lo que se había imaginado hasta el momento; deberían bastar algunos centenares de kilovoltios para pasar la barrera de potencial de un núcleo ligero. Cockroft expuso su idea a Rutherford, quien le encargó la construcción, con Walton, del pequeño acelerador necesario y la realización del experimento. Los dos físicos utilizaron un transformador de potencia que suministraba una tensión alternativa, rectificada por válvulas termoiónicas y filtrada por un condensa-

dor. Se trataba de conseguir 700 kilovoltios. El haz de protones, acelerados en un tubo de vacío, incidía sobre un blanco de litio; se trataba de observar los fragmentos de la desintegración del litio. Cuando, en la mañana del 14 de abril de 1932, la instalación llegó a 400 kilovoltios, Walton, reptando sobre sus manos y rodillas —para evitar la alta tensión del aparato— miró a través del pequeño microscopio colocado detrás de una pantalla de sulfuro de cinc, cerca del blanco de litio. Con gran alegría, vio los primeros centelleos. Cockroft llegó de inmediato, y Rutherford fue avisado al punto. Rutherford, ayudado por los dos jóvenes físicos, se colocó en la posición del experimentador. Estaba encantado y dijo: «Estos centelleos se parecen endiabladamente a los de una partícula alfa, y debería poder reconocer un centelleo de partícula alfa cuando veo uno: yo estaba allí, en el nacimiento de la partícula alfa y desde entonces no he dejado de observarlas» (citado por E. T. S. Walton). Ésta fue la primera reacción nuclear (desintegración) producida artificialmente. Se trataba de la reacción:

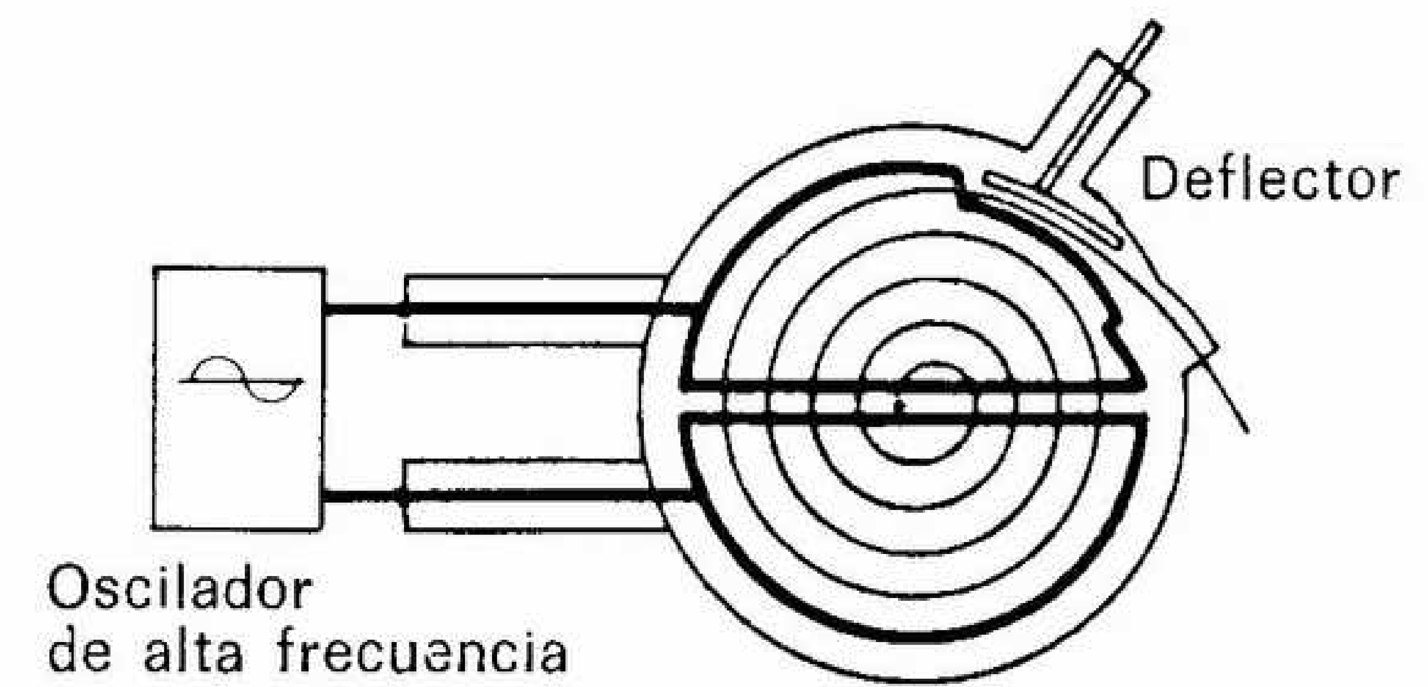


$$^{7}Li + p \rightarrow \alpha + \alpha$$

Más adelante, los dos físicos pudieron observar ambas partículas alfa, emitidas en sentidos contrarios, en coincidencia, con dos pantallas de sulfuro de cinc y dos microscopios.

El desarrollo más espectacular, en materia de aceleradores, fue realizado en Berkeley, en la Universidad de California, por E. O. Lawrence y sus colaboradores, en especial M. S. Livingston, a partir de 1930.

Al leer un artículo sobre el experimento de R. Wideröe, en la biblioteca de la universidad, durante el verano de 1929, Lawrence se dio cuenta de las grandes posibilidades de una aceleración periódica, que actuara varias veces seguidas sobre la misma partícula. Se hacía posible así proporcionar a los iones una gran velocidad, y por tanto una gran energía, sin emplear una alta tensión demasiado elevada. Concibió la idea de una máquina en la cual los iones giraran en espiral en un plano, a partir del centro, bajo el efecto de un campo magnético constante, perpendicular a ese plano. En el centro, el gas (hidrógeno y después deuterio o helio) era ionizado por los electrones emitidos por un filamento de volframio. Se aplicaba una diferencia de potencial alterna de alta frecuencia entre dos electrodos llamados D por su forma, análogos a dos mitades de caja de camembert una frente a otra (véase la figura). El ion se aceleraba, una primera vez, en el intervalo entre las dos D.



Principio en que se basa el ciclotrón. Las partículas siguen una trayectoria en espiral, a partir de la fuente central de iones. Se aceleran cada vez que atraviesan el intervalo entre las dos «D». Al final de la espiral, un deflector electrostático las desvía fuera del campo magnético.

Bajo el efecto del campo magnético, recorría un pequeño semicírculo en el interior de una de las dos medias cajas. En el interior de esta D, el ion no era sensible al potencial eléctrico. Este último cambiaba de sentido para acelerar de nuevo el ion cuando atravesaba de nuevo el intervalo entre las dos D. Y así sucesivamente, el ion recorría un gran número de círculos, de radio cada vez mayor y recibía, a cada media vuelta, un suplemento de energía. Lawrence había descubierto —notable propiedad— que el ion daba siempre una vuelta en el mismo intervalo de tiempo, cualesquiera que fueran su velocidad o el radio de su órbita. Esta propiedad de resonancia permitía utilizar el oscilador de alta tensión a una frecuencia fija, ajustada según el valor del campo magnético empleado. Por esta razón, Lawrence dio el nombre de «ciclotrón» a este nuevo acelerador. Al final de su espiral, las partículas aceleradas eran desviadas fuera del campo magnético por un deflector, cargado con un potencial determinado, y podían ser dirigidas hacia un colector.

Se realizó una primera prueba en 1930. El primer ciclotrón, que constaba de una sola D, y cuyo electroimán tenía unas piezas polares de 10 cm de diámetro, fue probado a principios de 1931. Una vez verificado el principio de su máquina, Lawrence obtuvo 1.000 dólares del National Research Council para construir un ciclotrón capaz de acelerar protones a 1,2 millones de electronvoltios. El diámetro de las piezas polares del imán era esta vez de 11 pulgadas, es decir de unos 28 cm.

Lawrence saltó de alegría cuando el marcador del galvanómetro indicó que, por primera vez, habían llegado al colector iones de más de 1 MeV. Estos resultados fueron publicados en la revista *Physical Review*, en abril de 1932. Lawrence y Livingston decían, en sus conclusiones, que habían conseguido el medio de obtener un acelerador que podía construirse y montarse con facilidad en un espacio de laboratorio relativamente pequeño, a partir de equipos muy modestos.

No existía aún en esta época, en Berkeley, ningún detector necesario para el estudio de las reacciones nucleares. Se construyeron a toda prisa, una vez conocidos los resultados de Cockroft y Walton.

Lawrence construyó a continuación una serie de ciclotrones cada vez con mejores performances, en primer lugar el de 27 pulgadas, que permitió obtener, por primera vez, un haz de deuterones, en marzo de 1933, después el de 37 pulgadas, el de 60 pulgadas y, por último, el de 184 pulgadas (1938) que llevaría los protones a más de 100 MeV.

Se había pasado de la artesanía a la fase profesional, pues estos aparatos no cabían ya en un «laboratorio modesto».

5. ALGUNOS PROTAGONISTAS

Dmitri Ivanovich Mendeleiev

Nacido en Tobolsk, Siberia, el 7 de febrero de 1834, Mendeleiev pertenecía a una familia cuyo número de hijos varía, según las biografías, entre catorce y diecisiete. Su padre dirigía una escuela; quedó ciego cuando Dmitri tenía apenas un año. Su madre debió entonces ponerse a trabajar y se empleó en una fábrica de vidrio. Mendeleiev finalizó sus estudios secundarios el año de la muerte de su padre a consecuencia de una tuberculosis.

Dmitri Mendeleiev se inscribió en la Universidad de San Petersburgo y se orientó hacia la química.

En 1854, bajo la dirección de Wurtz, redactó su primera memoria de química. Aprobó el ingreso con el número uno en el Instituto Pedagógico, con un trabajo sobre el isomorfismo; su tesis de licenciatura sobre los volúmenes específicos y su segunda tesis sobre las estructuras de las combinaciones de silicio confirmaron su interés por la química.

En 1859, se instaló en Heidelberg, donde trabajó con Kirchhoff y Bunsen sobre la capilaridad y la ebullición de los líquidos. Fue sin duda durante el primer Congreso Internacional de Químicos, en 1860, en Karlsruhe, cuando se manifestó por primera vez su interés por lo que llegó a ser la tabla periódica; en este año, en efecto, se emprendió un esfuerzo importante de unificación de las notaciones y de las convenciones y se trató ampliamente de la cuestión de los pesos moleculares (atómicos). Profesor en Simferopol y después en Odessa, Ucrania, en 1864 pasó a ser profesor en la Universidad de San Petersburgo, al mismo tiempo que publicó una tesis de doctorado acerca de la mezcla del alcohol y el agua.

Mendeleiev comprobó que si se ordenaban los 63 elementos químicos conocidos entonces según sus masas atómicas crecientes, se encontraban a intervalos regulares unos elementos cuyas características químicas eran muy próximas. Dejó en la tabla casillas vacías, y postuló la hipótesis de que éstas pertenecían a elementos aún desconocidos, pero de los cuales se podían prever las propiedades. Más tarde, se comprobaron todas las suposiciones de Mendeleiev.

De 1869 a 1871, aparecieron los *Principios de Química,* del que se ha dicho que es el mejor libro ruso de química jamás escrito. Se encuentra en él la famosa tabla periódica de los elementos clasificados por pesos atómicos crecientes. Traducido de inmediato al alemán, y después a otras muchas lenguas, su éxito fue considerable. Sigue siendo válido aún hoy.

En 1875, el descubrimiento del galio por F. Lecoq de Boisbaudran, que confirmó sus predicciones, proporcionó a Mendeleiev una gran popularidad; en 1879, el escandio y, en 1886, el germanio aportaron nuevas confirmaciones de la validez de sus concepciones.

El 7 de agosto de 1887, Mendeleiev, que deseaba realizar estudios meteorológicos en un «laboratorio del tiempo», fue invitado, en ocasión de un eclipse de Sol, a participar en una ascensión en globo. En el último momento, se advirtió que la capacidad de carga era insuficiente para embarcar a dos personas y Mendeleiev, que debía partir con un aeronauta, decidió hacer la ascensión en solitario. «Un aeróstato es también un instrumento de física, dijo a sus amigos, que trataban de disuadirlo de realizar tal experiencia. Ya veréis cuántas personas siguen la ascensión, como quien observa un experimento científico. No puedo socavar su fe en la ciencia».

Un poco más tarde, Mendeleiev pasó a ser consejero científico

para las aplicaciones militares, y estudió la nitrocelulosa. Se interesó también en el desarrollo de la industria del petróleo en Rusia y desarrolló una red de estaciones agronómicas. Fue el promotor de la introducción del sistema métrico en Rusia.

Mendeleiev siguió desarrollando una actividad muy diversificada hasta su muerte, el 2 de febrero de 1907, en San Petersburgo.

Wilhelm Konrad Röntgen

Físico alemán, nacido en Lennep (Prusia) el 27 de mayo de 1845. Wilhelm Konrad Röntgen realizó sus estudios en los Países Bajos, en Apeldoorn, tierra natal de su madre, y después en Utrecht.

Al no lograr aprobar el bachillerato, debido al parecer a las dificultades que tenía en el estudio de las lenguas muertas, Röntgen entró en la Escuela Cantonal de Zurich, donde el bachillerato no era obligatorio, y donde obtuvo el título de ingeniero mecánico.

Un año más tarde se doctoró en ciencias.

Trabajó entonces en Zurich y publicó, en 1870, una comunicación sobre la relación de los calores específicos del aire.

Pasó a la nueva Universidad alemana de Estrasburgo, junto con Kundt. Después, en 1879, dio clases en Giesen, y por último en Wurzburgo, donde llegara a ser rector de la universidad, seis años más tarde.

Descubrió los rayos X (que denominó así porque esta letra designa la incógnita en álgebra), en Wurzburgo, el 5 de noviembre de 1895. Se dice que fue tal su pasión por el descubrimiento que permaneció siete semanas en su laboratorio, día y noche, donde comía y dormía. No fue hasta diciembre que publicó, en las actas de la Sociedad de Física y de Medicina de Wurzburgo, una memoria titulada: *Acerca de un nuevo tipo de radiación.*

En enero de 1896, realizó la primera radiografía de la mano de uno de sus colegas e, inmediatamente después, se desarrollaron las aplicaciones médicas a partir de sus primeras fotografías.

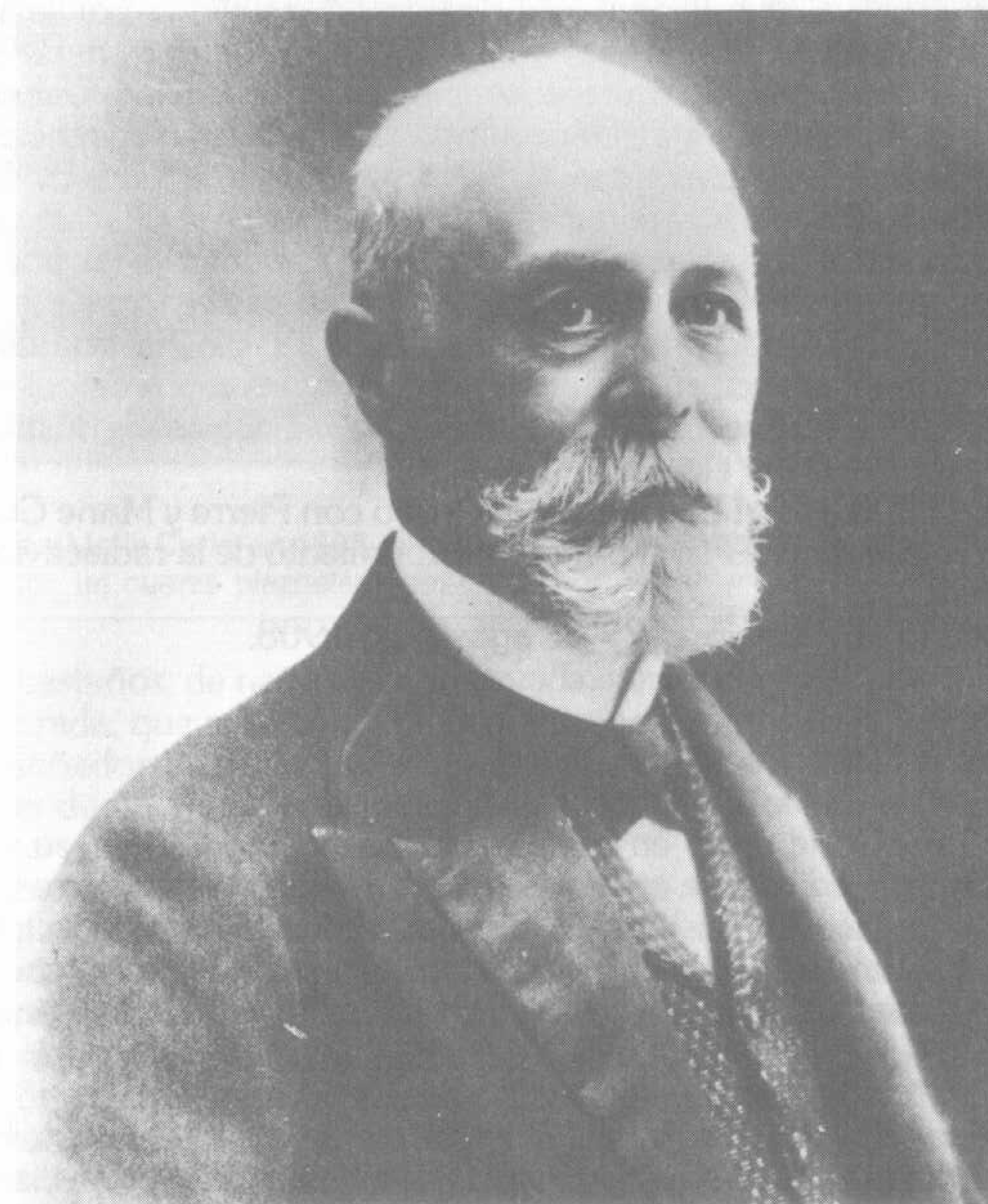
Röntgen fue el primer científico que recibió el premio Nobel de Física, en 1901, cuando daba clases en la Universidad Ludwig Maximilian, en Munich.

W. Röntgen murió, en Munich, el 10 de febrero de 1923.

Antoine Henri Becquerel

Antoine Henri Becquerel, nieto, hijo y padre de politécnicos, todos ellos profesores de física en el Museo de Historia Natural, y todos miembros de la Academia de Ciencias, es el más célebre de esta familia de físicos.

Nació en París, el 15 de diciembre de 1852, ingresó en la Escuela Politécnica en 1872 y después en la Escuela de Caminos,



Henri Becquerel.

Canales y Puertos; obtuvo el título de ingeniero en 1877. Profesor de física en el Museo de Historia Natural, en 1892, fue nombrado profesor en la Escuela Politécnica, en 1895.

H. Becquerel no se limitó a la enseñanza; le apasionaba la investigación. Sus trabajos principales tratan de la polarización rotatoria magnética y de la acción del magnetismo terrestre en la atmósfera. Pero sus investigaciones sobre la fosforescencia y sobre la absorción de la luz en los cristales le llevaron, de forma natural, a interesarse por los trabajos de Röntgen sobre los rayos X, trabajos de los que tuvo conocimiento a principios del año 1896. Becquerel se apresuró a investigar si otros cuerpos, excitados por la luz, emitían radiaciones análogas a los rayos X. En febrero de 1896, descubrió que una sal de uranio emitía una radiación desconocida capaz de impresionar una placa fotográfica, incluso en ausencia de luz. Ésta fue la primera evidencia de la existencia de la radiactividad.

En los dos años siguientes, Becquerel observó que algunas radiaciones de sustancias radiactivas podían ser desviadas por un campo magnético y que una parte de la radiación consistía en partículas cargadas negativamente. Se convenció de que estas partículas eran electrones rápidos idénticos a los rayos catódicos.

En 1901, H. Becquerel demostró que la radiactividad constituía una propiedad del elemento uranio.

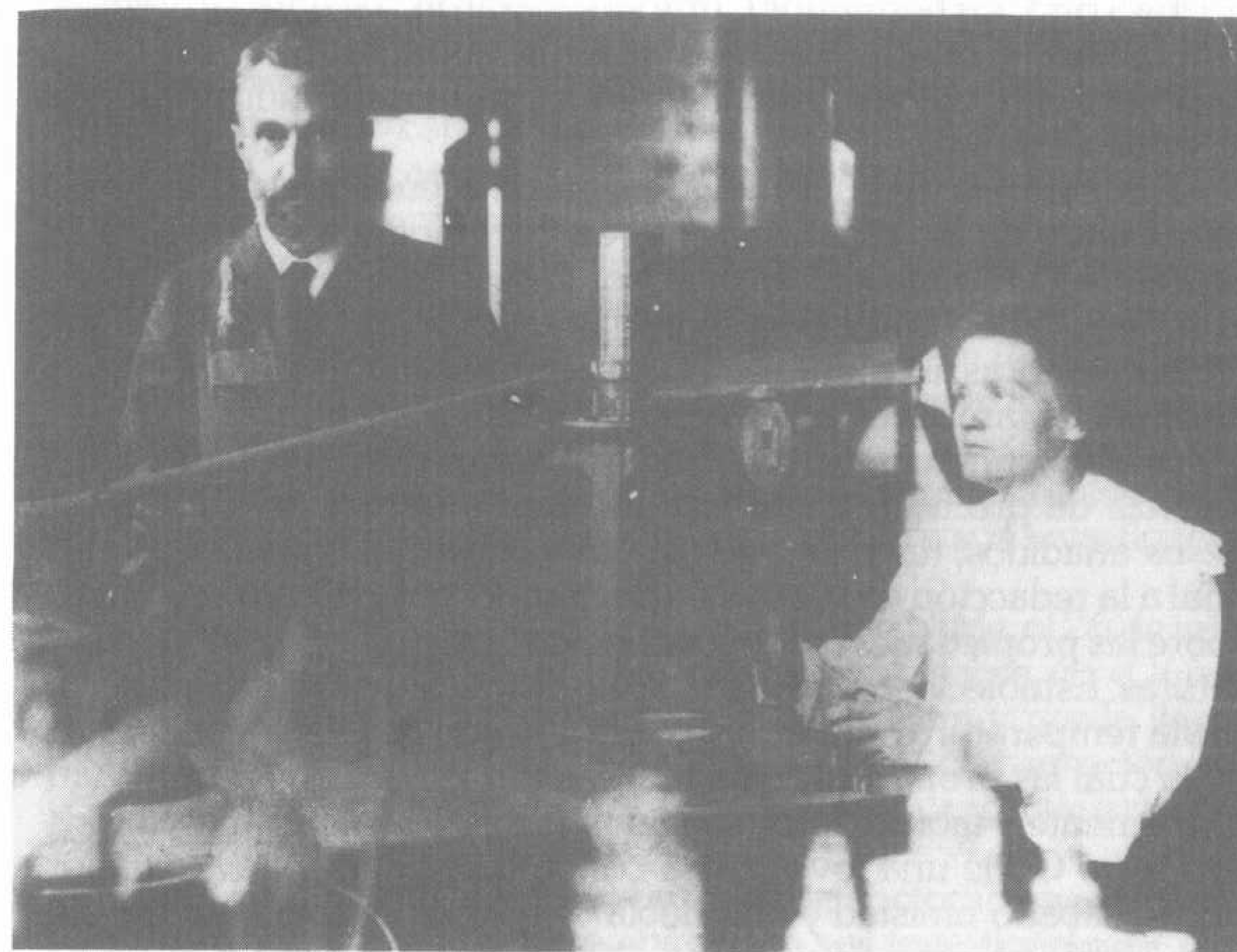
En 1903, Henri Becquerel compartió con Pierre y Marie Curie el premio Nobel de Física por el descubrimiento de la radiactividad natural.

Murió en Croisic, el 25 de agosto de 1908.

Pierre y Marie Curie

Pierre Curie nació en París, el 15 de mayo de 1859, en una familia de médicos, de origen alsaciano y protestante. Pierre y su hermano Jacques se sintieron atraídos, desde la infancia, por las ciencias. Sin embargo, Pierre, idealista e independiente, no podía doblegarse a la disciplina y al trabajo sistemático de la enseñanza tradicional; un preceptor le preparará para el bachillerato, que aprobará brillantemente a la edad de 16 años.

A los 18 años, obtuvo la licenciatura en ciencias físicas. Fue nombrado, a los 19 años, preparador ayudante de Dessains, en la Facultad de Ciencias de París, encargado de las prácticas de física de los estudiantes. Era entonces un joven alto y delgado, de cabellos castaños, de naturaleza reservada, con una viva intensidad en la mirada, que revelaba una vida interior profunda; era asimismo un soñador impenitente: «Hay que hacer de la vida un sueño y hacer de un sueño una realidad», escribía este joven poeta en su diario personal.



Pierre y Marie Curie, en 1898, ante una cámara de ionización y su electrómetro, con un cuarzo piezoeléctrico.

Su primer trabajo trató acerca de la determinación de las longitudes de onda caloríficas. Después, con su hermano, ayudante de Friedel en el laboratorio de mineralogía de la Sorbona, se dedicó al estudio de los cristales. Su trabajo en equipo les permitió descubrir el fenómeno de la piezoelectricidad, que consiste en una polarización eléctrica producida por la compresión o la dilatación de los cristales sin centro de simetría. A partir de esta constatación, concibieron un cuarzo piezoeléctrico que servía para medir corrientes eléctricas de baja intensidad. Poco después modificaron el electrómetro de cuadrantes, llamado más tarde electrómetro Curie.

En 1883, los hermanos Curie se separaron. Jacques se dirigió a Montpellier, y Pierre fue nombrado director de trabajos de la recientemente creada Escuela de Física y Química Industriales de la ciudad de París.

En 1884, Pierre publicó una memoria acerca de las cuestiones del orden y de las repeticiones y, en 1885, otro trabajo sobre la simetría y las repeticiones, así como un ensayo teórico sobre la formación de cristales y sobre las constantes capilares de sus diferentes caras; introdujo en física, generalizándolas, las nociones de simetría familiares a los cristalógrafos.

Sería erróneo creer que Pierre Curie era sólo un teórico. Su balanza de precisión aperiódica de lectura directa de los últimos pesos añadidos, fue concebida en la época en que ponía el punto final a la redacción de su tesis de doctorado, que defendió en 1895, sobre las propiedades magnéticas de los cuerpos a diversas temperaturas. Estableció la denominada ley de Curie y mostró que existía cierta temperatura crítica, llamada hoy punto de Curie, por encima de la cual las propiedades magnéticas desaparecían o se reducían fuertemente. Había sido invitada a presenciar la defensa de la tesis de Pierre Curie una joven física con la cual el joven investigador había trabado amistad y que había conocido, en la primavera del año 1894, en casa de un físico polaco amigo suyo. La joven se llamaba Manya Sklodowska.

Manya había nacido el 7 de noviembre de 1867, en Varsovia, Polonia; era la quinta hija de una familia de maestros. Su juventud fue desgraciada. Su hermana mayor, Zozia, murió del tifus, y su madre de tuberculosis. Manya se refugió en el estudio. Una medalla de oro sería la recompensa a su dedicación. Se le concedió la nota máxima de 5 en todas las asignaturas (incluidas las cuatro lenguas extranjeras que se estudiaban entonces: el ruso, el francés, el alemán y el inglés). Al terminar los estudios secundarios, Manya era una muchacha de una educación estricta, y de sentimientos generosos: «Hay en su naturaleza una dignidad discreta, una gracia que acompañan siempre su entusiasmo y su pasión» (Ève Curie). Manya, que debía ganarse la vida, ejercerá durante algunos años las funciones de preceptora en casa de familias ricas.

Pero Manya alimentaba la ambición de ir a estudiar física en la Sorbona, en París. Cabe señalar que la física era, en esa época, una materia que atraía poco a las mujeres. Realizó su sueño en 1891. Dos años después de su llegada a París, consiguió ser la primera en la licenciatura de física. Este brillante éxito lo obtuvo tras superar numerosas dificultades. Reembolsará la beca Alexandrovich, tan pronto cobre su primer salario, para que esta suma pueda ayudar a otros estudiantes. Este comportamiento, sin precedentes en los anales del Comité, asombrará a los administradores de la Fundación.

Proseguir a toda costa, durante varios años, las investigaciones en un cobertizo malsano y descubrir, por su radiactividad, dos elementos nuevos, tal sería la lección de entereza y tenacidad que esa mujer iba a dar pronto a su alrededor. Esa fuerza de carácter no sería efímera. Después de la muerte de Pierre Curie, su marido y compañero de trabajo, Marie seguirá enseñando esa nueva parte de la ciencia que es la radiactividad y proseguirá sus investigaciones.

Se había casado, sin ceremonias, con Pierre Curie, el 26 de julio de 1895. Le describe en el libro que escribió sobre él: «Quedé impresionada por la expresión de su mirada clara y por la ligera apariencia de abandono en su alta estatura. Su conversación, un poco lenta y reflexiva, su sencillez, su sonrisa a la vez grave y juvenil, inspiraban confianza.»

Marie Curie eligió el tema de su tesis de doctorado aconsejada por Pierre. Muy pronto, Pierre abandonó sus investigaciones personales para trabajar con ella en una dependencia de la Escuela de Física y Química. La joven pareja logró, en julio y diciembre de 1898, descubrir dos nuevos elementos, especialmente radiactivos, el polonio y el radio.

Su primer hijo nació en septiembre de 1897: una niña, a la que pusieron por nombre Irène. En diciembre de 1904, nacerá Ève.

En junio de 1903, Marie Curie defendió su tesis acerca de las nuevas sustancias radiactivas y, en diciembre del mismo año, Pierre y Marie Curie recibieron, junto con Henri Becquerel, el premio Nobel de Física, por el descubrimiento de la radiactividad natural.

Francia empezaba a interesarse por los trabajos de los dos sabios, que eran ya famosos en el extranjero. En 1905, Pierre fue nombrado profesor de la Sorbona, y se le asignaron dos aulas en la calle Cuvier. Marie Curie, por su parte, fue nombrada jefe de laboratorio. Pero un trágico accidente puso fin a esta colaboración. El 19 de abril de 1906, Pierre fue atropellado por un coche de caballos en la calle Dauphine. Murió en el acto.

Marie Curie continuó sola las investigaciones iniciadas en común. Estudió las diferentes familias radiactivas y trató de precisar

las propiedades químicas de los diferentes radioelementos. A pesar de las numerosas reticencias debidas al antifeminismo y a la patriotería de los medios universitarios de entonces, ocupó la cátedra de física general; fue la primera mujer en ocupar un puesto de responsabilidad en la enseñanza y la investigación. Sin embargo, no fue admitida a la Academia de Ciencias cuando presentó su candidatura. En 1911, viuda desde hacía cinco años, el jurado de Estocolmo le otorgó un segundo premio Nobel, esta vez de química, por la determinación del peso atómico del radio. Al mismo tiempo que se dedicaba a la educación de sus dos hijas, trataba de obtener un laboratorio donde continuar sus investigaciones. Se le concedió en 1911. El Instituto del Radio listo para funcionar en 1914, se utilizó primeramente en la formación de enfermeras radiólogas durante la guerra de 1914-1918. Su servicio de emanaciones de radón proporcionó productos para las curas de los heridos. En efecto, se había comprobado que esta emanación podía acelerar la cicatrización de las heridas, lo que permitía a los soldados volver rápidamente al campo de batalla. Marie Curie acudió con frecuencia al frente, como las otras voluntarias, al volante de su «pequeño Curie», automóvil equipado con material radiológico móvil. Instruyó a su propia hija, Irène, que entonces apenas tenía 18 años, y que realizó también, en los hospitales de campaña, radiografías de los heridos durante toda la guerra.

Sólo después de terminada ésta, el Instituto del Radio pudo desempeñar su cometido: enseñar la radiactividad y formar en sus técnicas a investigadores llegados del mundo entero. Entre estos jóvenes investigadores estaba su hija Irène, que pasó a ser ayudante de su madre. El Instituto del Radio de la Universidad de París se dividió en dos departamentos: uno dedicado a las investigaciones físicas y químicas, el laboratorio Curie, cuya directora era Marie Curie, y otro laboratorio dedicado a investigaciones biológicas, el laboratorio Pasteur, dirigido por Claude Regaud, y después por Antoine Lacassagne.

En 1921, una amplia colecta entre las mujeres norteamericanas, organizada por la periodista Mrs. W. B. Meloney, reunió la suma suficiente para comprar un gramo de radio, en la fábrica de radio de Pittsburgh, y donarlo a Marie Curie. Irène y Ève acompañaron a su madre en una gran gira por Estados Unidos donde fue recibida triunfalmente.

En 1929, sus admiradoras norteamericanas le entregaron otro gramo de radio, que donó a la Universidad de Varsovia.

En 1928, instaló un laboratorio anexo al Instituto del Radio, en Arcueil, para los tratamientos químicos de los cuerpos radiactivos.

Marie Curie formó parte de la Comisión Internacional de Cooperación Intelectual de la Sociedad de las Naciones, en Ginebra.

Marie Curie murió, agotada, el 6 de julio de 1934, poco tiempo después de haber vivido con alegría el descubrimiento de la radiactividad artificial, realizado por Frédéric e Irène Joliot-Curie.

«La enfermedad que le ha causado la muerte es una anemia perniciosa aplástica de desarrollo rápido y febril. La médula ósea no ha reaccionado, probablemente porque estaba alterada por una larga acumulación de radiaciones», escribió el Dr. Tobé, responsable del sanatorio de Sancellemoz, en la Alta Saboya, donde había sido llevada unos días antes.

Ernest Rutherford

Ernest Rutherford fue uno de los protagonistas más destacados de esa nueva aventura científica.

Su abuelo, Georges Rutherford, emigró de Escocia a Nueva Zelanda, en 1842. Su hijo James, entonces de 3 años de edad, creció en ese país: veía a su padre trabajar en su taller de carretero. James se casó con Caroline Thompson, y la pareja vivió cerca de Nelson, en la isla del Sur, donde poseían una pequeña granja y cultivaban el lino. Ernest Rutherford nació allí, el 30 de agosto de 1871, segundo hijo de una familia de doce.

Ingresó en el colegio a la edad de 15 años y fue siempre el primero, no sólo en matemáticas, en física y en química, sino también en latín, en literatura inglesa, en francés y en historia. Le gustaba fotografiar cualquier cosa con el aparato que se había construido; desde muy joven, desmontaba los despertadores y se divertía instalando, en el campo, molinos de agua. La lectura constituía también una de sus ocupaciones favoritas, y, por encima de todo, las biografías de personajes célebres le apasionaban. En 1889, obtuvo una beca para el colegio Canterbury de Christchurch, donde destacó pronto al construir un detector de ondas electromagnéticas.

Prosiguió sus estudios bajo la dirección de J. J. Thomson, en el Cavendish Laboratory, en Cambridge, en el Reino Unido. En agosto de 1898, fue nombrado profesor de física en la Universidad MacGill, en Montreal, Canadá. Acababa de descubrirse la radiacti-

vidad natural, y E. Rutherford se interesó de inmediato en este tema. En su laboratorio de la Universidad MacGill, emprendió un estudio sobre la producción de iones negativos y positivos por los rayos X, y puso a punto un aparato para medir la velocidad de los iones en un campo eléctrico.

Demostró que los rayos alfa son átomos de helio y, con F. Soddy, estableció la teoría de las transformaciones radiactivas.

Pasó una temporada en Nueva Zelanda para contraer matrimonio con Marie Newton, y en 1901, nació su única hija.

Gozaba ya de reputación internacional y, en 1907, fue llamado a la Universidad de Manchester, donde un profesor titular le cedía voluntariamente su cátedra. En esa universidad realizó sus trabajos más conocidos, en particular la demostración de la existencia del núcleo del átomo, así como la observación de la primera transmutación.

El premio Nobel no tardó en recompensar su obra, en 1908, por sus investigaciones sobre la química de las sustancias radiactivas.

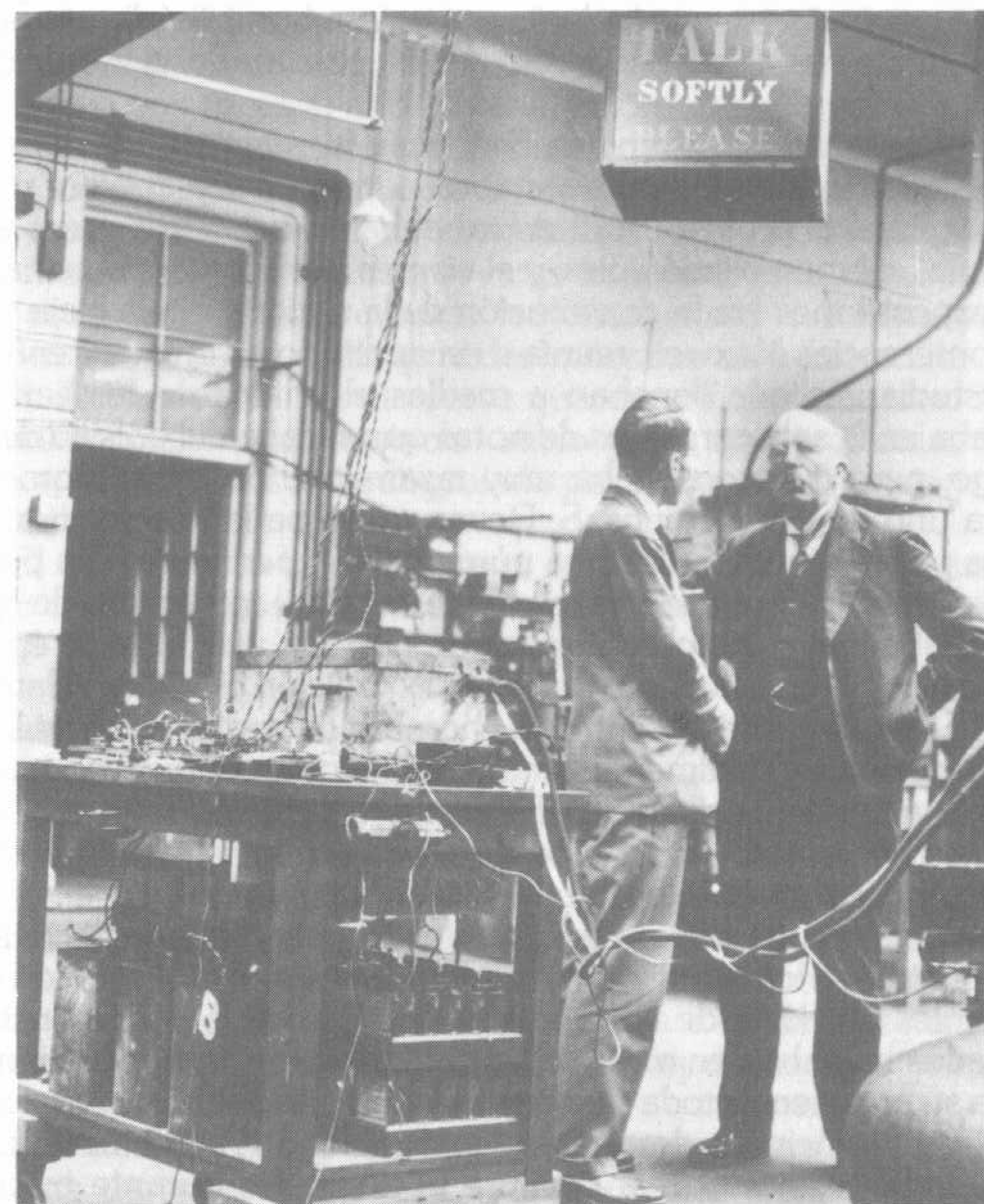
En 1919, se le consideraba ya una de las mayores figuras de la ciencia; tomó el relevo de J. J. Thomson, lord Rayleigh y C. Maxwell, como director del Cavendish Laboratory, en Cambridge, función que ejerció hasta su muerte, acaecida en Londres, el 19 de octubre de 1937.

En el Cavendish Laboratory emitió la hipótesis de una nueva partícula, el neutrón, que su discípulo Chadwick encontraría unos años más tarde; en este mismo laboratorio P. M. Blackett realizó sus importantes experimentos con la cámara de Wilson, y también allí, bajo la dirección de Rutherford, Cockroft y Walton construyeron su primer acelerador y pudieron realizar la primera reacción nuclear con proyectiles acelerados artificialmente.

Durante la Primera Guerra Mundial vivió con dolor la pérdida de numerosos colegas. Su colaborador alemán Geiger fue movilizado en el campo enemigo, y su ayudante H. G. J. Moseley, oficial de marina, desapareció en los Dardanelos.

Rutherford tenía la costumbre de montar sus experimentos de la forma más simple posible, sin complicaciones inútiles.

Era un profesor maravilloso que sabía transmitir a sus discípulos su entusiasmo por la investigación científica; pero se manifestaba a veces de forma brusca, por ejemplo cuando el experimento que estaba efectuando no se desarrollaba como él quería. No podía tolerar la pereza o la indiferencia de sus colaboradores. Se cuenta



Ernest Rutherford (a la derecha) en el Laboratorio Cavendish, con Ratcliffe.

que, antes de una reunión de laboratorio, apostrofó así a uno de sus alumnos: «No porque tenga usted el sombrero colgado detrás de la puerta voy a creer que está trabajando.»

Desde 1933, E. Rutherford se lanzó a una campaña para salvar a los científicos judíos amenazados por el nuevo régimen nacionalsocialista y encontrarles trabajo fuera de su país. Einstein fue uno de los primeros en ser invitados a Gran Bretaña.

Rutherford era muy consciente de sus cualidades. Un día a uno de sus compañeros, que le decía que era un hombre feliz, siempre en el candelero, le replicó «Pero yo he construido el candelero, ¿no?»

El Laboratorio Cavendish constituía el reino de Rutherford; todos los físicos extranjeros soñaban con ir a trabajar allí. En los años treinta, el profesor Rutherford daba su curso tres veces a la semana, el lunes, el miércoles, y el viernes por la tarde. El tema de sus exposiciones era la constitución de la materia. En la vieja sala de conferencias Maxwell, reunía a un auditorio de una cuarentena de estudiantes que llenaban a medias el anfiteatro. Rutherford entraba en la sala con hojas de notas que sacaba del bolsillo de su abrigo, pero que consultaba muy raramente. Su curso, como lo relata uno de sus alumnos, S. Devon, excitaba la imaginación de todos por su viveza. Efectuaba numerosos experimentos en público, y todos los estudiantes presentes tenían conciencia de que escuchaban a un hombre ilustre que narraba una historia épica, algo así como la historia de una gran expedición científica relatada por su jefe. El contraste entre ese hombre de rostro patriarcal, un poco arcaico, de vestimenta y maneras victorianas, que exponía el campo más moderno de la física, no dejaba de sorprender a quienes no estaban advertidos de su carácter. Este contraste se daba también en el Laboratorio Cavendish.

Además de los cursos de Rutherford, había otro acontecimiento que atraía a los estudiantes de la universidad. Era la reunión del miércoles por la tarde en la misma sala Maxwell, donde ilustres invitados hablaban en mesa redonda. Rutherford presidía e imprimía a su presidencia toda su extraordinaria personalidad. Presentaba al conferenciante, después del inevitable té; a continuación, se sentaba al lado del orador, frente al auditorio, durante toda la conferencia. A guisa de conclusión de la exposición que acababan de escuchar, aportaba sus comentarios y daba explicaciones sencillas.

No quedaría del todo descrito el Laboratorio Cavendish si no se mencionara lo que se llamaba la «nursery» en la época histórica de Rutherford, es decir, una buhardilla repleta de aparatos antiguos inutilizados donde los investigadores jóvenes podían ejercitarse en las manipulaciones. Hay que recordar también que, cada tarde, muy puntualmente, a las seis, un ayudante anunciaba en todos los laboratorios que era la hora de cerrar. Cuando alguna protesta llegaba hasta él, Rutherford respondía con esta sentencia implacable: «Si a las seis no se ha conseguido lo que se pretendía, es mejor irse a casa y reflexionar sobre lo que se ha hecho hoy y lo que debe hacerse mañana.»

Una o dos veces al año, los Rutherford daban una recepción. Era casi obligatorio asistir a ella. Una tarjeta de invitación a un té, que tendría lugar determinado domingo, en Newham Cottage, a dos pasos del laboratorio, era enviada a todos. Por supuesto, se discutía de física, en el curso de estas reuniones amistosas, pero lo que era imprescindible, cuando lady Rutherford lo solicitaba, era pasear por el jardín y dar grandes muestras de admiración.

E. Rutherford tenía un porte que era difícil de olvidar. Alto, corpulento, altivo, el mostacho rubio y los ojos profundamente azules, su sencillez sólo era igualada por su penetrante visión de la naturaleza.

El ilustre sabio está enterrado en la Abadía de Westminster, junto a otros físicos británicos: Newton, Faraday, lord Kelvin.

Frédérick Soddy

F. Soddy nació en Eastbourne, Sussex (Gran Bretaña), el 2 de septiembre de 1877.

Realizó sus estudios en Oxford, y después en Londres, con William Ramsay, donde empezó a interesarse en la radiactividad.

Marcha después a Canadá, a Montreal, para trabajar con Rutherford, en la Universidad MacGill, sobre las desintegraciones radiactivas. Estableció, con él, en 1902, la ley de las transformaciones radiactivas.

Formuló, al mismo tiempo que Fajans y Russell, las leyes de valencia de la radiactividad. Durante este trabajo, se dio cuenta de que existían, entre el uranio y el plomo, de 40 a 50 radioelementos con propiedades radiactivas diferentes, pero que no había bastante sitio en la tabla de Mendeleiev. Dado que no se lograba separar químicamente cierto número de ellos, llegó a la conclusión de la existencia de los isótopos.

En 1914, demostró que los elementos estables finales de las familias radiactivas naturales eran isótopos del plomo.

Por su descubrimiento de la isotopía, obtuvo el premio Nobel de Química, en 1921.

F. Soddy dio clases en Aberdeen y en Oxford.

Murió en Brighton, el 22 de septiembre de 1956.

Charles Thomson Rees Wilson

C. T. R. Wilson nació en Glencorse, en Escocia, el 14 de febrero de 1869.

Era hijo de un criador de ovejas. A la muerte de su padre tenía 4 años, y su madre llevó a la familia a Manchester. Estudió en Cambridge y, en 1895, entró a trabajar en el Laboratorio Cavendish, cuyo director era J. J. Thomson. Estudió la formación de nubes a escala de laboratorio y puso a punto una cámara de niebla a la que se dio el nombre de cámara de Wilson.

Este aparato desempeñó un papel muy importante en las investigaciones en radiactividad y en física nuclear (véase recuadro acerca de la cámara de Wilson en la página 32).

Con esta cámara, Wilson pudo observar, en 1896, la formación de gotitas de niebla por los rayos X y, en 1911, los electrones proyectados por los rayos X, así como las partículas cargadas de gran energía emitidas por los cuerpos radiactivos.

En 1927, obtuvo el premio Nobel de Física, al mismo tiempo que A. H. Compton.

C. T. R. Wilson falleció en Edimburgo, el 15 de noviembre de 1959.

Niels Bohr

Niels Bohr nació en Copenhague, el 7 de octubre de 1885, en el seno de una familia con tres hijos, que recibieron una educación muy tradicional, pero con especial énfasis en el espíritu de independencia. Frecuentó la escuela Gammelholm, una institución de ideario severo donde los trabajos manuales tenían una gran importancia. La influencia de su tía, Hanna Adler, famosa profesora de Copenhague, se hizo sentir desde un principio. Ella era quien llevaba a «sus niños» a los parques, exposiciones y museos, y no perdía ninguna ocasión de tratar de discutir con sus protegidos y dar respuestas a todas las preguntas que le planteaban. Su padre, Christian Bohr, profesor de fisiología, se interesaba más particularmente de su sensibilidad. Salía a pasear con sus hijos y les leía poemas de Goethe o extractos del teatro de Shakespeare. En casa, el profesor Bohr mantenía largas discusiones con sus colegas, en las que sus hijos también participaban.

En 1903, el joven Niels entró en la universidad, donde sus profesores advirtieron muy pronto su pasión por las matemáticas y la física. Su espíritu crítico le inclinaba hacia filósofos como Spinoza y Kierkegaard; pero también destacó por sus hazañas en el equipo de fútbol. Niels y su hermano Harold participaron, con otros diez estudiantes, en un grupo de discusión denominado «Ekliptica». A la edad de 21 años obtuvo, de la Academia danesa de Ciencias, una medalla de oro por la confirmación de las teorías de Rayleigh. Inmediatamente después de haber recibido tal distinción, dio una conferencia a sus amigos estudiantes acerca de las transformaciones radiactivas. Más tarde, mientras preparaba su tesis de doctorado, no abandonó otras actividades más relajantes, como la lectura de los filósofos y los paseos por la isla de Fynn. Mantuvo una correspondencia continua con su hermano, que seguía unos estudios avanzados de matemáticas en Gotinga, Alemania. Defendió su tesis en 1911, tesis que se apoyaba, en gran parte, en las teorías de Lorentz, y obtuvo entonces una beca de la Fundación Carlsberg. Decidió ir a Cambridge donde le invitó el venerable J. J. Thomson, en el Trinity College, y al cual señaló, en la primera cena a la que fue invitado, lo que llamó «errores» en su teoría de los electrones. Un tiempo después, explicaba a los físicos jóvenes de su Instituto que ésta no era la mejor manera para entrar en contacto con un anciano.

La lectura de Dickens le permitió mejorar su vocabulario inglés. En la cena anual del Cavendish Laboratory, oyó hablar por primera vez a Rutherford, en aquella época profesor en Manchester, y quedó profundamente impresionado. En la primavera de 1912, recibió autorización para trabajar en Manchester, donde los físicos estaban preocupados por las consecuencias del nuevo modelo de átomo concebido por Rutherford. De regreso a Copenhague, contrajo matrimonio, en agosto de 1912, con Margrethe Norlund, de quien apreciaba los afectuosos estímulos. Como viaje de bodas, Margrethe y Niels visitaron Inglaterra y Escocia.

Después de unas jornadas de intensa labor, Niels Bohr terminó, en Copenhague, su trabajo sobre el modelo del átomo que había empezado en Manchester. Lo envió a Rutherford para su aprobación. Consciente del hecho de que, con anterioridad, había aconsejado, injustamente, a Bohr que no diera muestras de originalidad, Rutherford leyó el manuscrito con suma atención. Una vez más los dos hombres se perdieron, en una discusión apasionada por correspondencia. Bohr decidió ir a Manchester para defender su teoría. Ante la insistencia del danés y la sagacidad de sus explicacio-

nes, Rutherford terminó por aprobar sus ideas e incluso declaró en una ocasión: «Este joven danés es el hombre más inteligente que jamás haya conocido.» Mientras tanto Moseley, utilizando su espectrómetro, había confirmado ciertas predicciones del modelo de Bohr.

Después de una nueva estancia de un año en Manchester, Niels Bohr regresó a Dinamarca, durante el verano de 1916, donde fue nombrado profesor de física teórica en la Universidad de Copenhague. Se le concedió entonces una ayuda financiera para edificar un instituto de física teórica, que hoy lleva su nombre y que se ha convertido en un reputado centro de investigación. En 1919 M. Siegbahn le invitó a dictar una serie de conferencias en Lund, donde conoció a Arnold Sommerfeld, con quien trabó amistad. No conoció a Albert Einstein y Max Plank hasta 1920, en Berlín.

En 1922, N. Bohr obtuvo la consagración internacional al recibir el premio Nobel de Física. Había escrito con sumo cuidado su discurso de recepción y elegido las fotografías que debían ilustrarlo; desgraciadamente, lo olvidó todo en el hotel, antes de la ceremonia, y debió improvisarlo ante la impresionante asamblea.

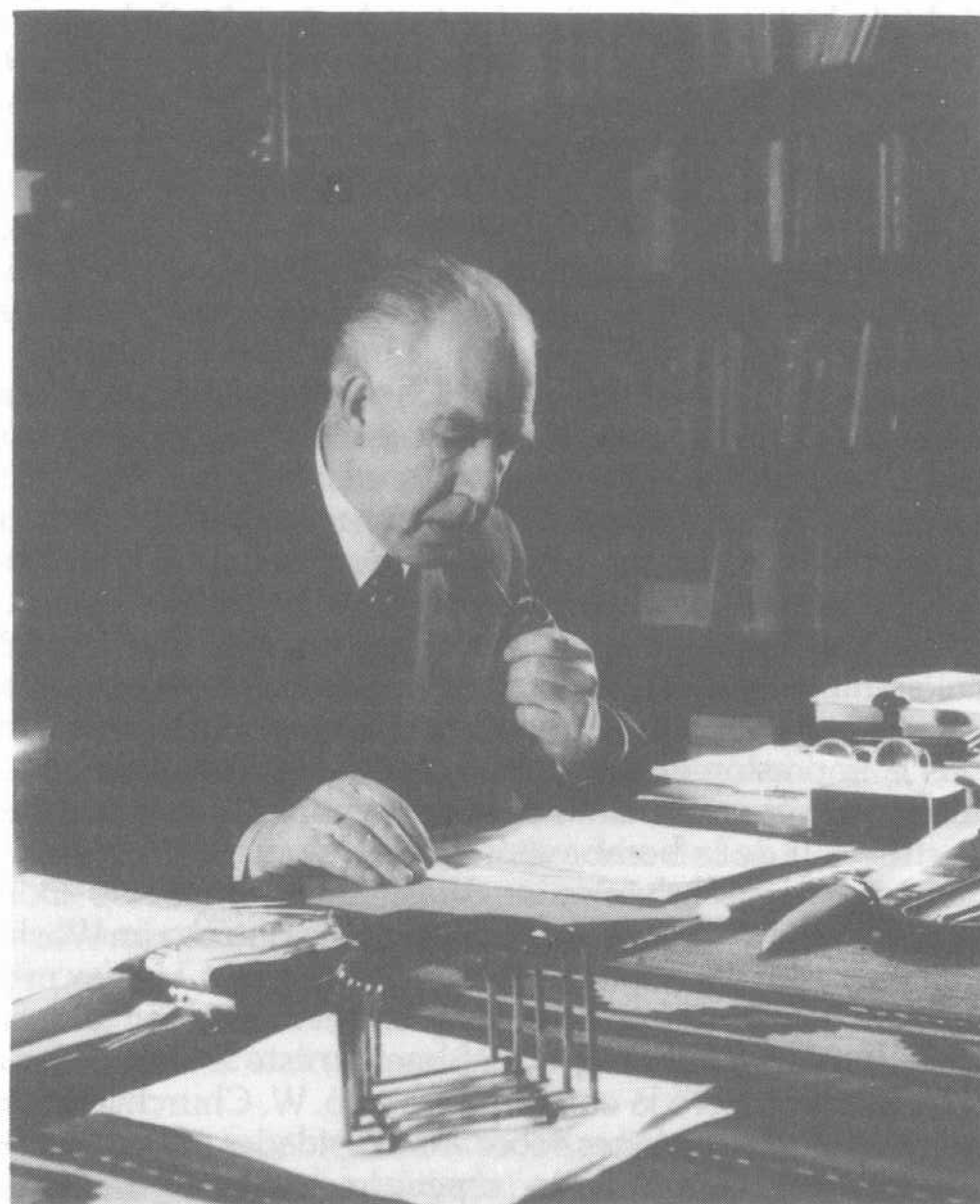
Durante los años que siguieron, Niels Bohr trabajó mucho en la interpretación de la nueva mecánica cuántica y mantuvo una célebre discusión con Einstein sobre este tema.

Pero Bohr no se contentó con ser un gran científico. Fue asimismo un excelente padre de familia. Dedicó una gran parte de su tiempo a sus cinco hijos, como su familia lo había hecho antes con él, descubriéndoles un panorama magnífico o enseñándoles el mecanismo de un reloj. Por la noche, en casa, les maravillaba haciendo sonar para ellos las copas de cristal. Les contaba también leyendas islandesas.

En 1933, N. Bohr fue invitado a dar una conferencia en Chicago, con motivo de la Exposición Universal. Lo aprovechó para visitar a Lawrence, en Berkeley, y a Millikan, que daba clases en el California Institute of Technology (Caltech). Allí, conoció a un joven físico norteamericano, cuyo nombre era J. Robert Oppenheimer.

En 1934, una tragedia hirió a la feliz familia Bohr. Su hijo mayor, Christian, que navegaba con él en su embarcación *La Chita*, cayó al mar y desapareció.

En 1936-1937, N. Bohr concibió el modelo del núcleo compuesto para las reacciones nucleares, así como el modelo de la gota líquida. Estos modelos tuvieron gran importancia para el desarrollo



Niels Bohr.

de la física nuclear. En esa época, emprendió un viaje alrededor del mundo, y permaneció durante un tiempo en la URSS y en Japón.

En enero de 1939, fue el primero en dar, en Estados Unidos, la noticia del descubrimiento de la fisión. Con J. A. Wheeler, elaboró la primera teoría cuantitativa de ésta.

En septiembre de 1939, estalló la guerra, y N. Bohr decidió compartir la suerte de su país. Hasta finales de 1943, las condiciones de trabajo fueron tolerables, en Dinamarca. Los británicos

deseaban vivamente que Bohr se reuniera con ellos; Chadwick le envió a tal objeto un mensaje secreto; al principio, Bohr no creía que su ayuda pudiera ser de verdadera utilidad. Pero, el 29 de septiembre de 1943, cuando estaba a punto de ser detenido, Bohr embarcó con su esposa en una barca de pesca y se refugió en Suecia. A petición suya, el rey de Suecia le aseguró que intervendría cerca de las autoridades alemanas en favor de los judíos daneses. Antes de dejar Dinamarca, N. Bohr disolvió su medalla Nobel de oro en agua regia, y la «conservó» así en un estante hasta el final de la guerra.

Después, el 6 de octubre de 1943, a bordo de un «Mosquito» Niels Bohr voló hacia Gran Bretaña en condiciones especialmente difíciles. Llegó a Escocia inconsciente, pues no había conprendido las instrucciones de utilización del oxígeno a bordo. Se instaló en Estados Unidos, con su hijo Aage. Desde 1943 a 1945 colaboró en el proyecto anglonorteamericano de investigaciones atómicas, y pasó varias semanas en Los Álamos, bajo el seudónimo de Nicholas Baker. Su presencia fue muy reconfortante para los numerosos físicos que trabajaban allí. Aunque tuviera entonces 60 años, daba a todos la impresión de ser el depositario de toda la sabiduría del mundo. En esa época, N. Bohr se inquietó por las consecuencias de la construcción de la bomba atómica. Pidió ser recibido por lord Halifax, embajador británico en Washington, y por sir Donald Campbell, ministro de Su Majestad que se encontraba en Washington, para hacerles partícipes de sus preocupaciones. Halifax propuso a N. Bohr regresar a Londres y entrevistarse con el primer ministro Winston Churchill personalmente; éste le recibió durante unos 30 minutos, pero la entrevista fracasó. W. Churchill hizo que se realizaran investigaciones sobre sus actividades para asegurarse que no divulgaba información, especialmente a los físicos de la URSS. Niels Bohr trató también de convencer a Roosevelt de no utilizar la bomba y, si el presidente de los EE.UU. no hubiera muerto, cabe imaginar que la petición de Bohr habría sido tomada en consideración al más alto nivel.

Volvió a Dinamarca, en 1945, y se instaló en la residencia honorífica que le había otorgado de forma vitalicia la Academia danesa de Ciencias.

En 1950, con la guerra fría en todo su apogeo, se dirigió a las Naciones Unidas y abogó por el intercambio de informaciones atómicas, como primera condición de la confianza mutua y de la comprensión entre las naciones.

Niels Bohr murió el 18 de noviembre de 1962, cuando estaba con unos amigos en su casa. La causa de su muerte fue una trombosis de la aorta.

Patrick Maynard Stuart Blackett

Nacido en Londres, el 18 de noviembre de 1897, Patrick Blackett ingresó en la Escuela Naval a los 13 años pero, después de la Primera Guerra Mundial, dejó la Marina para estudiar en la Universidad de Cambridge. Trabajó en el laboratorio de Rutherford, donde desarrolló la técnica de la cámara de Wilson, que utilizó para estudiar las transmutaciones provocadas por partículas alfa. En 1925, aportó una prueba fotográfica de la transmutación de un núcleo de nitrógeno en núcleo de oxígeno.

A partir de 1932, se dedicó al estudio de los rayos cósmicos, en colaboración con Giuseppe Occhialini. Los dos científicos realizaron las primeras mediciones de masas de los corpúsculos cósmicos, curvando sus trayectorias por la acción de un campo magnético. Hicieron patentes los fenómenos de cascadas y de haces y, después del descubrimiento de Anderson, demostraron que los electrones positivos provienen de la materialización de los fotones.

Fue el primero en utilizar una cámara de Wilson activada por la radiación cósmica, regida por la coincidencia de contadores Geiger-Müller.

En 1933, fue nombrado profesor en el Birkbeck College de la Universidad de Londres y, en 1937, profesor en la Universidad de Manchester.

Durante la Segunda Guerra Mundial, desempeñó un papel importante en la lucha antisubmarina al desarrollar el radar y, después, en la organización de las investigaciones sobre la energía atómica. Obtuvo el premio Nobel de Física en 1948. Estaba entonces en la Universidad de Manchester, donde trabajaba en el tema de los rayos cósmicos y en problemas de astrofísica.

Después de la guerra, P. M. S. Blackett sintió inquietud por la posible utilización del arma atómica y apoyó las iniciativas, en particular las de F. Joliot, para prevenir una tal eventualidad. Murió en Londres, en 1974.

George Gamow

G. Gamow nació en Odessa, Ucrania, en 1904.
Se diplomó en la Universidad de Leningrado.
En 1928, acudió a Gotinga, Alemania, que era entonces un santuario de la mecánica cuántica, que utilizó en el establecimiento de la teoría de la radiactividad alfa. Demostró, en particular, la posibilidad de que una partícula alfa atraviese la barrera de potencial del núcleo. Residió en Copenhague durante un año y desarrolló un modelo de gota líquida para un núcleo constituido por partículas alfa. Ésta fue una primera versión de un modelo nuclear de gota líquida.
Sus cartas chispeantes, escritas en diversos idiomas, llenas de inspiración y de ideas originales, encantaban a sus corresponsales.
En 1933, abandonó definitivamente la Unión Soviética y, después de sucesivas estancias en París, Copenhague y Cambridge, pasó a ser profesor en Washington, en 1934. Trabajó con E. Teller, sobre la teoría de la emisión beta. Obtuvo la ciudadanía norteamericana. En 1942, se dedicó a la astrofísica, y Gamow y Teller proporcionaron un modelo de la estructura interna de las estrellas gigantes rojas. En 1954, se interesó en la bioquímica y propuso el concepto de un código genético determinado por el orden de los constituyentes del ADN. En 1956, fue nombrado profesor de física en Boulder, Colorado, donde escribió, en particular, obras de divulgación científica de cariz humorístico.
Murió en 1968.

John Douglas Cockroft y Ernest Thomas Sinton Walton

John Cockroft nació en Todmorden (Yorkshire), el 27 de mayo de 1897. Era hijo de un director de empresa textil. Después de sus estudios en la Universidad de Manchester y en el Saint-John's College de Cambridge, trabajó en electrotécnica al servicio de la Metropolitan Vickers, donde se especializó en alta tensión.
En 1922, entró en el laboratorio de Rutherford, en Cambridge, donde trabajó, en colaboración con P. Kapitza, en la producción de temperaturas muy bajas y campos magnéticos intensos.

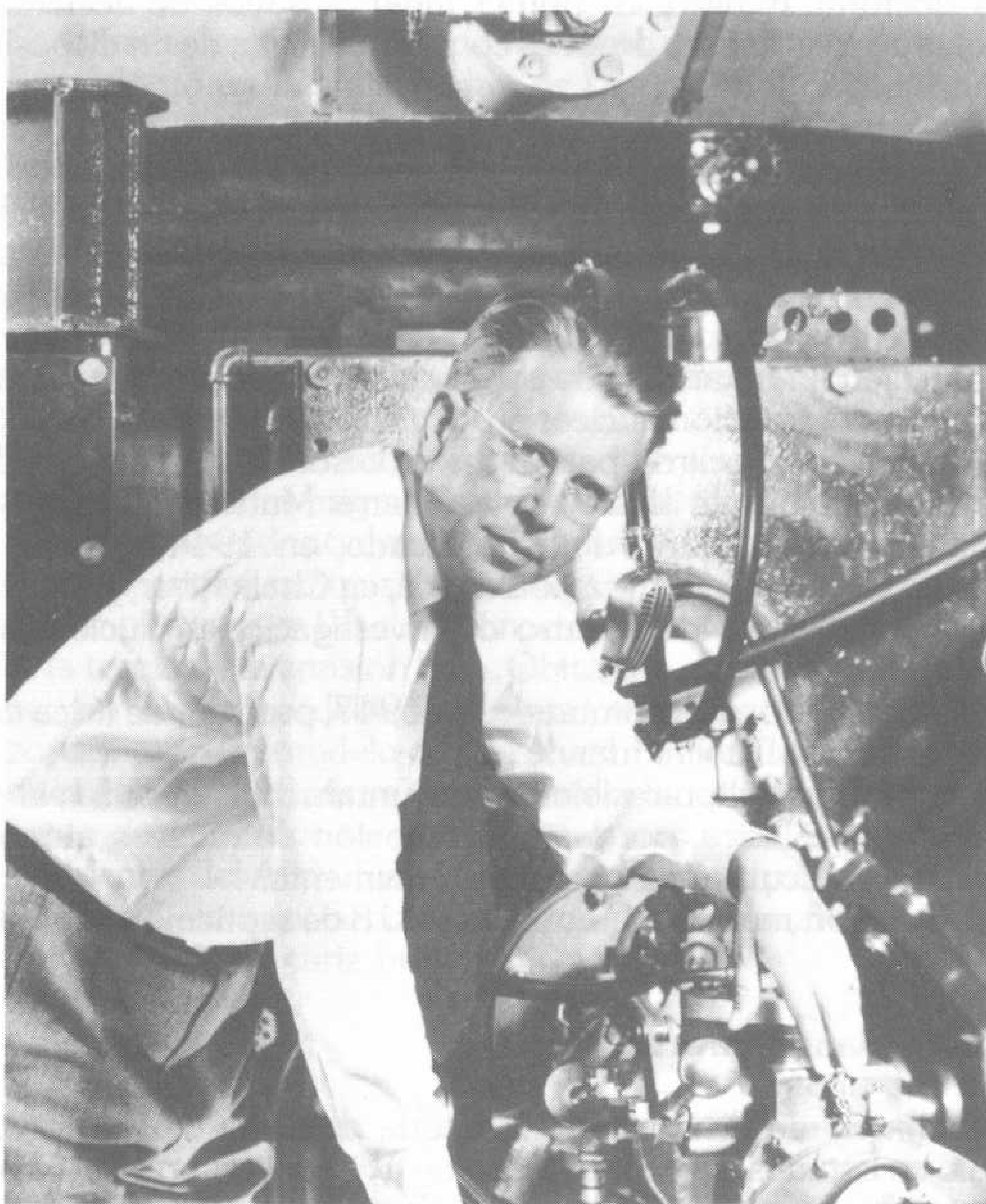
Ernest Thomas S. Walton nació en Dungarvan, Irlanda, en 1903.

Entró, en 1927, en el Cavendish Laboratory, para preparar su tesis doctoral. Realizó, en primer lugar, ensayos de aceleración circular de electrones y después consideró la idea de un dispositivo de aceleración lineal.

Como consecuencia de los trabajos teóricos de Gamow, Rutherford, a principios de 1929, propuso a Cockroft y a Walton trabajar en equipo para construir un generador de alta tensión para acelerar los protones. Desarrollaron entonces el acelerador de partículas que lleva su nombre; gracias a este aparato, pudieron observar, en una gran sala de conferencias acondicionada para tal fin, la primera reacción nuclear producida artificialmente, en 1932.
En 1939, J. Cockroft pasó a ser profesor de la Universidad de Cambridge. Durante la Segunda Guerra Mundial, participó en investigaciones militares. Fue nombrado, en 1944, director del proyecto de energía atómica de Canadá, en Chalk River, y, dos años más tarde, director del Centro de Investigaciones Nucleares de Harwell.
E. T. S. Walton fue nombrado, en 1947, profesor de física en la Universidad de Dublín, Irlanda.
Cockroft y Walton recibieron conjuntamente, en 1951, el premio Nobel de Física, por la transmutación de núcleos atómicos mediante partículas aceleradas artificialmente.
J. Cockroft murió en Cambridge, el 18 de septiembre de 1967.

Ernest Orlando Lawrence

El abuelo de Ernest Lawrence, que procedía de Noruega, se instaló en Estados Unidos, en Madison (Wisconsin), en 1840. Fue el maestro de escuela de la comunidad de pioneros en la que vivía. Su hijo Carl, cursó estudios en la universidad y se graduó de profesor. Contrajo matrimonio en 1900, con Miss G. Jacobsen, hija de emigrantes noruegos. Ernest Lawrence nació el 8 de agosto de 1901, en Canton, Dakota. Con su hermano John, fue educado según los principios luteranos en el respeto a los valores morales. Leía poco pero trabajaba de un tirón; consiguió saltar todo un curso al terminar sus estudios secundarios. Durante el verano, Ernest Lawrence hacía trabajos por las granjas para comprarse un equipo de radio y artilugios eléctricos. Inició estudios de medicina, que interrumpió muy pronto para estudiar química.



Ernest O. Lawrence ante uno de sus ciclotrones.

W. F. G. Swann fue quien le inició en la experimentación. El electromagnetismo le apasionaba. Se trasladó a Chicago, en 1923, con Swann. En esta ciudad, Compton efectuaba los trabajos sobre su famoso efecto; pero el poder absoluto de los profesores no le agradaba y, cuando Swann aceptó un puesto en Yale, Lawrence siguió poco más tarde su ejemplo. Preparó una tesis sobre el efecto fotoeléctrico en el vapor de potasio. Fue sin duda en Yale donde

empezó a manifestar sus excelentes cualidades de físico. Con Jess Beams, de quien se hizo amigo, puso a punto una elegante técnica para medir los intervalos de tiempo muy cortos, que aplicó a la medición de la vida media de los estados excitados de los átomos.

En agosto de 1928, Lawrence fue nombrado profesor de la Universidad de Berkeley, donde llevó a cabo la mayor parte de sus trabajos. En 1929, llegó a su conocimiento la comunicación de Wideröe acerca de la utilización de la alta frecuencia para acelerar las partículas cargadas hasta grandes energías, lo cual le dio la idea del ciclotrón. En las navidades del año 1930, el primer ciclotrón proporcionó sus primeros protones acelerados a una energía de 80.000 eV.

Lawrence contrajo matrimonio con Nelly Blumer, en 1932, de quien tuvo seis hijos. Aunque apasionado por su trabajo, se ocupó atentamente de la educación de sus hijos.

En 1932, con la ayuda de Livingston, perfeccionó su ciclotrón y después construyó otros, de rendimiento y tamaño cada vez mayores. La palabra ciclotrón no apareció en la literatura científica hasta 1935.

Ernest Lawrence estaba siempre dispuesto para ayudar a cualquiera que quisiera construir un ciclotrón, tanto si era Frédéric Joliot, Pegram o Chadwick. En 1935, su hermano John, médico de profesión, se unió a él, seguido poco después por Joseph Hamilton, y ambos desarrollaron, en Berkeley, las aplicaciones biológicas y médicas del nuevo tipo de acelerador. Las aplicaciones médicas del ciclotrón permitieron a Lawrence obtener ayudas y subvenciones con más facilidad.

Nombrado director del laboratorio de Berkeley, que posteriormente llevará su nombre, podría decirse que fue el prototipo de director de un gran laboratorio moderno. Tomaba parte activa en todas las discusiones técnicas y visitaba con mucha regularidad las secciones que dependían de su autoridad. El tratamiento de pacientes mediante un haz de neutrones se inició, en Berkeley, en 1938.

Obtuvo el premio Nobel de Física, en 1939, por la invención del ciclotrón. En 1940, se descubrió el neptunio en su laboratorio; también en Berkeley se descubrieron la mayor parte de los demás transuránicos.

El electroimán destinado al último de los ciclotrones de Lawrence fue transformado durante la Segunda Guerra Mundial para

funcionar como separador de isótopos, con el fin de separar el uranio 235; al terminar la guerra, se utilizó para el primer sincrociclotrón.

Ernest Lawrence murió en Palo Alto, California, el 27 de agosto de 1958, en plena actividad.

4. TRES PARTÍCULAS NUEVAS

1. EL ELECTRÓN POSITIVO

En 1928, el físico P. A. M. Dirac, en Cambridge, formuló por vez primera una teoría cuántica relativista del electrón que tenía en cuenta su movimiento de rotación intrínseco, el spin (véase capítulo 2, apartado 5, página 15). Esta teoría conducía a una ecuación que admitía dos soluciones: una para una partícula de carga negativa y otra para una partícula de carga positiva; la primera solución correspondía al electrón, y Dirac pensó (en la primera edición de su libro de 1930) que la segunda solución correspondía al protón. No obstante, Dirac estaba preocupado por la ausencia de simetría de las dos soluciones, puesto que el protón tiene una masa casi dos mil veces mayor que la del electrón; esta duda fue confirmada por un comentario crítico de J. R. Oppenheimer y Dirac propuso, en 1931, la existencia de un antielectrón, cargado positivamente.

En 1930, en la costa oeste de EE.UU., en Pasadena (California), R. A. Millikan y C. D. Anderson construyeron una cámara de Wilson vertical, situada en un campo magnético de 15.000 gauss, para estudiar la radiación cósmica (véase recuadro de la página 68). La curvatura de las trayectorias en el campo magnético permitía determinar el impulso de las partículas y su carga. El 2 de agosto de 1932, C. D. Anderson observó una trayectoria curiosa en extremo (véase fotografía página 69). No podía tratarse de un protón a causa de la longitud de la huella y por el hecho de que la partícula había atravesado seis milímetros de plomo (visible en el centro del cliché). La diferencia entre la curvatura por encima y por debajo de la placa de plomo indicaba que la partícula venía de

LA RADIACIÓN CÓSMICA

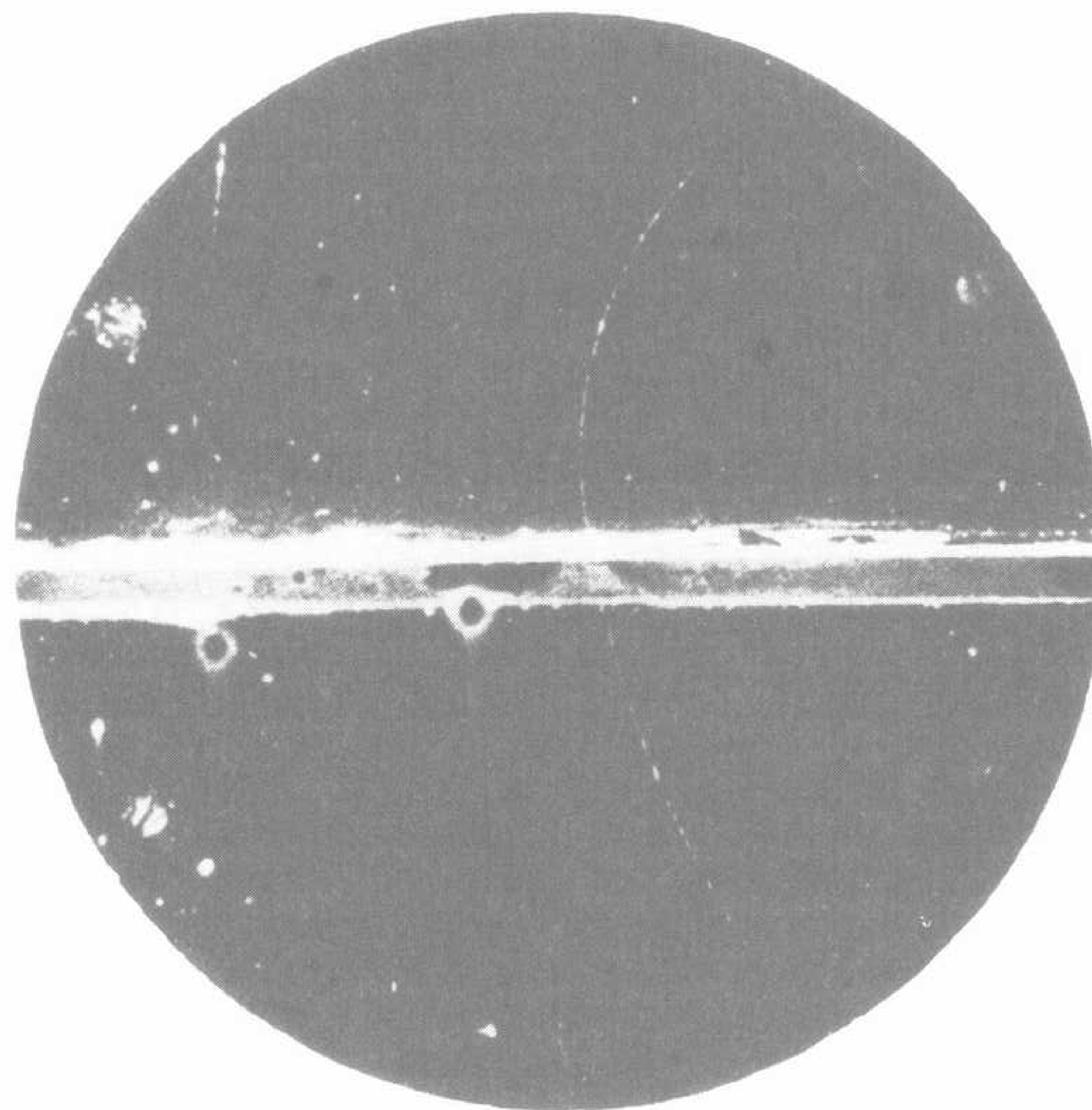
Inmediatamente después de los primeros trabajos sobre la radiactividad natural, los científicos advirtieron, al utilizar electroscopios –aparatos capaces de medir la carga eléctrica (ionización) liberada en un volumen dado de gas por las radiaciones– que existía, después de retirar la fuente radiactiva estudiada, «una ionización residual» (trabajos de Elster y Geitel, y de C. T. R. Wilson, en 1900). Se hicieron esfuerzos por todos los medios para reducir esta ionización residual, llamada movimiento propio, que perturbaba las medidas. Los científicos se dieron cuenta de que no podían conseguirlo por completo. Subsistía siempre un poco de ionización debida a una radiación que costó mucho trabajo identificar. Los experimentos de Hess, en 1911, utilizando detectores situados en globos demostraron, por vez primera, que esta ionización residual aumentaba con la altitud y, por tanto, tenía que deberse a una radiación que provenía del espacio.

Fue el principio de una serie de trabajos dirigidos, en especial, por Kolhörster, Millikan, Bothe, D. Skobelzyne y B. Rossi, entre 1913 y 1930, que mostraron que existe una radiación cósmica penetrante, que llega a la Tierra procedente de las capas superiores de la atmósfera. Pudo establecerse después la existencia de rayos cósmicos primarios que atravesaban el espacio interestelar, procedentes del Sol, o bien de otros cuerpos celestes. Estos rayos, que experimentan la acción de los campos magnéticos que encuentran (los de las estrellas y planetas y, en particular, el de la Tierra), tienen una energía muy grande y provocan, al llegar a la atmósfera terrestre, toda una cascada de reacciones en su interacción con los núcleos de los átomos con los que chocan. En estas cascadas se producen partículas efímeras, de vida media muy inferior a un segundo (por ejemplo, los muones μ y los mesones π).

El estudio de las radiaciones cósmicas ha dado lugar, históricamente, a dos desarrollos diferentes: el primero ha conducido al estudio de las propiedades de esas partículas elementales efímeras, varias de las cuales han sido descubiertas en la radiación cósmica antes de haberse podido crear en el laboratorio gracias a los grandes aceleradores. Este campo se ha convertido en el de la física de las partículas elementales. Un segundo camino ha consistido en estudiar el origen de la radiación cósmica, y, gracias al desarrollo de las ascensiones en globos, y después al lanzamiento de satélites, esta vía se ha unido al ámbito de la astrofísica.

abajo. El sentido del campo magnético no daba lugar a dudas; se trataba claramente de una partícula de carga positiva que tenía una masa comparable a la del electrón. Anderson le dio el nombre de electrón positivo o positrón.

La primera publicación de estos resultados se realizó en una revista de divulgación, *Science*. Se pidió a todo un grupo de físicos del laboratorio de Pasadena que estudiaran el cliché, de una manera crítica. Anderson esperó a tener varios clichés parecidos antes de publicar, unos meses después, en *Physical Review*, su descubrimiento, confirmado poco después por P. M. S. Blackett y G. P. Occhialini, y que le valió el premio Nobel. Ésta era realmente la segunda solución de la ecuación de Dirac. Después de esta brillante



Cliché de cámara de Wilson del primer positrón, observado por C. D. Anderson en 1932. La trayectoria es claramente más curva por encima de la lámina de plomo (cuya sección se observa en el centro de la cámara) que por debajo. La partícula viene, pues, de la parte inferior, y pierde energía al atravesar el plomo. Dado que conocía el sentido del campo magnético, C. D. Anderson dedujo que sólo podía tratarse de un electrón positivo.

confirmación experimental, Dirac pudo modificar la conclusión de su último capítulo, en la segunda edición de su libro.

Era el primer ejemplo de una antipartícula, al que siguieron pronto otros: el electrón (e^-) y el positrón (e^+) son antipartículas el uno del otro. Ambas partículas poseen las mismas propiedades, pero sus cargas y sus momentos magnéticos son opuestos.

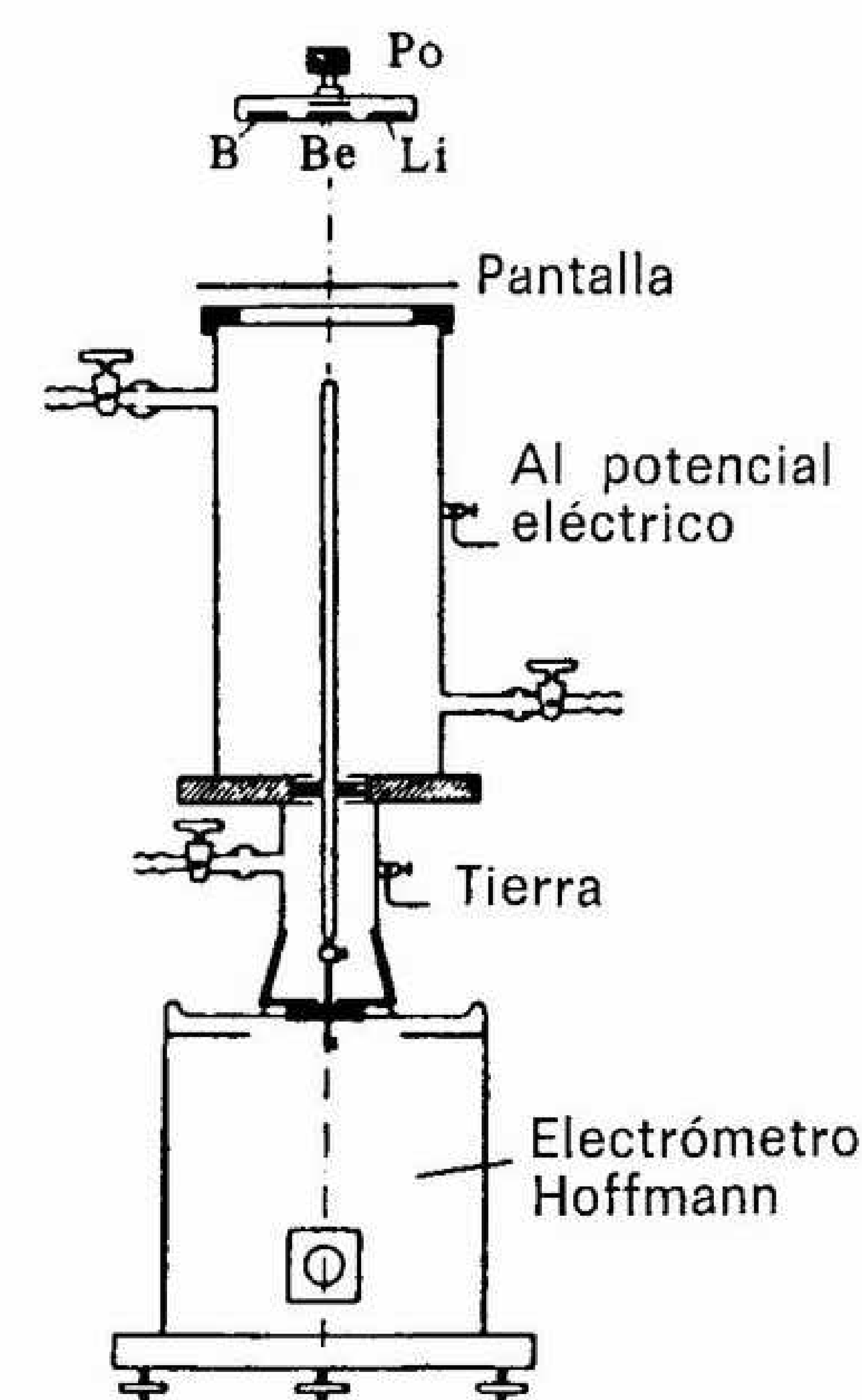
Dirac había predicho que al chocar un electrón positivo con un electrón negativo, se «aniquilarían», y la energía correspondiente a sus masas aparecería bajo la forma de dos fotones, de 0,511 MeV cada uno, emitidos en sentidos contrarios. A la inversa, la absorción de un fotón de energía superior a 1,022 MeV podría conducir a una «materialización» en forma de aparición de un par electrón positivo-electrón negativo. Estas predicciones fueron verificadas experimentalmente poco después, como veremos en el capítulo 5. Era una de las mejores ilustraciones de la posibilidad de transformación de la energía que corresponde a la masa en energía de radiación electromagnética, conservándose la energía total (y también la carga eléctrica total).

2. UN PROTÓN SIN CARGA: EL NEUTRÓN

En otoño de 1930, el físico alemán W. Bothe, ayudado por un joven investigador, H. Becker, estudiaba en Berlín la radiación provocada en una serie de núcleos ligeros, del litio al aluminio, por las partículas α de una fuente de polonio. Observaron así la emisión, por parte del berilio y del boro, de una radiación muy penetrante, que supusieron que era radiación γ capaz de atravesar espesores de materia más importantes que todas las radiaciones γ conocidas hasta entonces.

Algo más de un año después, en diciembre de 1931, Irène Curie y Frédéric Joliot realizaron de nuevo estos experimentos y estudiaron la absorción de esta radiación, denominada «γ nuclear», con una fuente de polonio muy intensa.

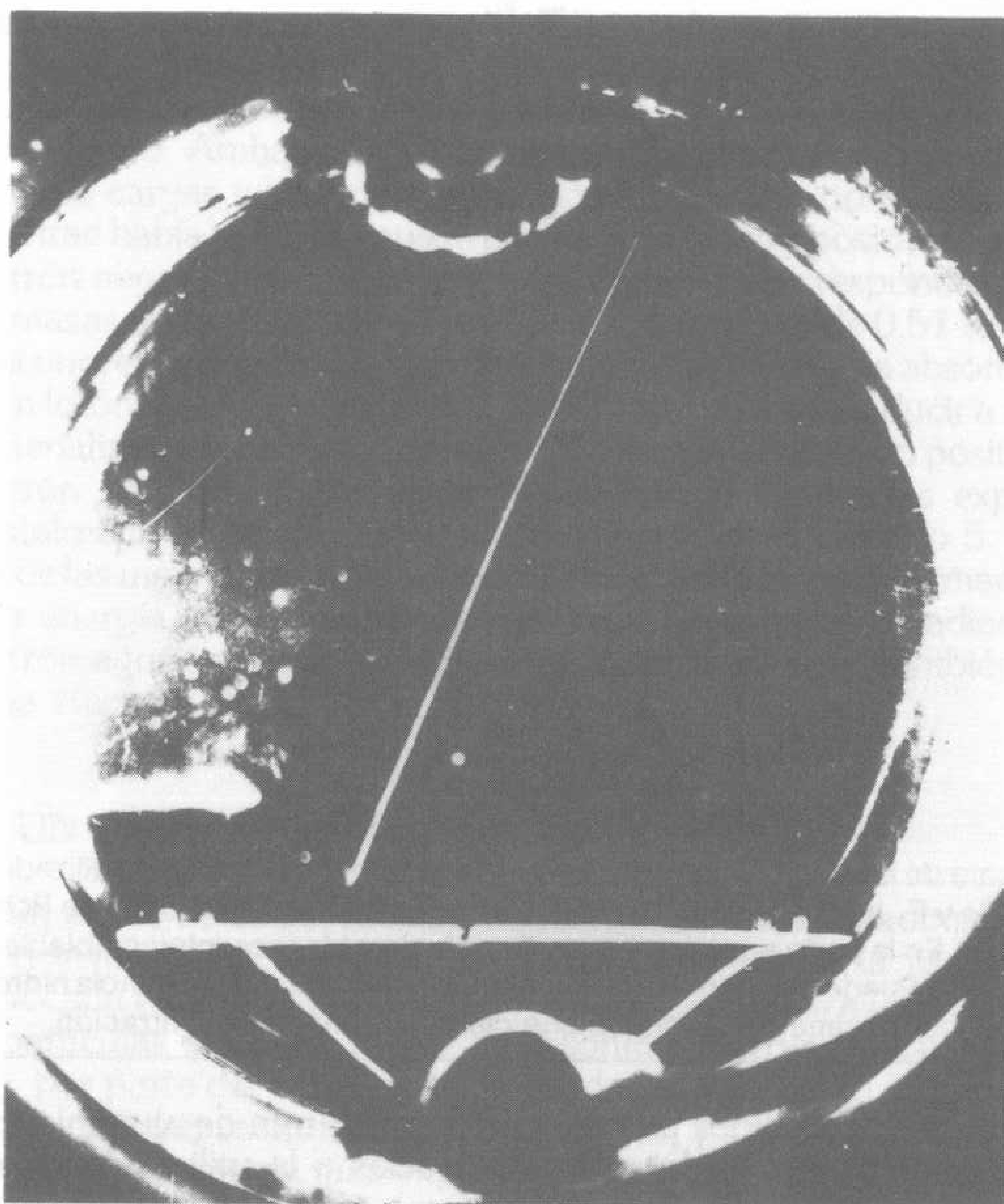
El 18 de enero de 1932, los dos jóvenes científicos franceses publicaron, en las Actas de la Academia de Ciencias, un resultado sorprendente: la radiación *muy penetrante* del berilio y del boro irradiados por las radiaciones alfa de una fuente de polonio muy intensa, era capaz de arrancar núcleos de hidrógeno (protones) a sustancias hidrogenadas como la parafina, el agua y el celofán. Estos protones eran, a su vez, *muy poco penetrantes*, puesto que



Cámara de ionización montada sobre un electrómetro Hoffmann, utilizada por I. Curie y F. Joliot para sus investigaciones sobre las radiaciones de Bothe y Becker. En la parte superior, fuente de polonio y blancos intercambiables de Be, B o Li. Puede colocarse una pantalla (por ejemplo, una sustancia hidrogenada), por encima de la rendija que cierra la cámara de ionización.

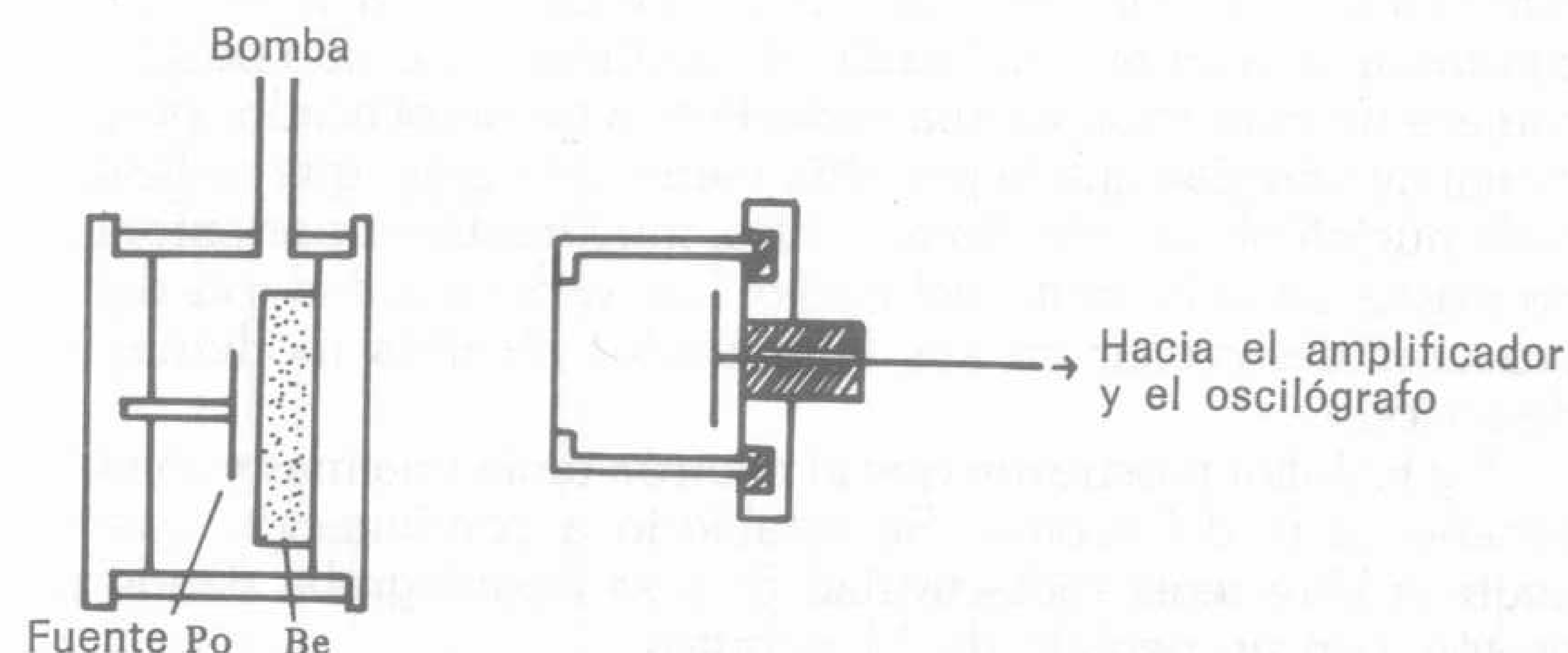
quedaban absorbidos por completo en 0,2 mm de aluminio. Esta observación había sido realizada gracias a la utilización de una cámara de ionización —cerrada por una rendija muy estrecha que permitía observar incluso la radiación muy poco penetrante— montada sobre un electrómetro Hoffmann especialmente sensible y delicado. La corriente medida por el electrómetro, en lugar de disminuir, aumentaba hasta un factor 2 cuando se interponían pantallas de materia hidrogenada ante la cámara de ionización. Unos días después, observaron directamente esta proyección de protones a partir de una placa de parafina colocada en una cámara de Wilson. Creyeron que se trataba de una especie de efecto Compton de rayos gamma de energía muy elevada sobre los protones, pero esta hipótesis parecía difícil de admitir.

Cuando J. Chadwick, que empezaba a trabajar en el mismo



Cliché Wilson de la trayectoria de un potrón de retroceso de alta energía, que ha sido proyectado de una placa de parafina (cuya sección se observa en la parte inferior), por la acción de la radiación de Bothe y Becker (neutrones) procedente de la parte inferior del cliché. (I. Curie y F. Joliot, 1932).

tema, en el Cavendish Laboratory de Cambridge, leyó estos resultados en las Actas, quedó asombrado en extremo y enseguida fue a mostrar la publicación a Rutherford, director del laboratorio. Rutherford gritó: «No lo creo en absoluto». Pidió a su colaborador que verificara las medidas de los Joliot. Lo que se realizó de inmediato,



Esquema del experimento que visualiza el neutrón, realizado por J. Chadwick. *A la izquierda,* fuente de polonio y blanco de berilio; *a la derecha,* cámara de ionización conectada a un amplificador de impulsos. Podían colocarse pantallas entre el berilio y la cámara de ionización.

gracias a un nuevo equipo y a las fuentes intensas de polonio que Chadwick acababa de preparar. Ahora bien, la idea de una partícula neutra, de masa igual a la del protón, flotaba en el ambiente del laboratorio Cavendish desde que Rutherford había sugerido, en 1920, en su *Bakerian Lecture,* que una partícula así podía existir. Al cabo de unos días de intenso trabajo, Chadwick, al estudiar las características de las colisiones de la radiación desconocida con los protones y con otros núcleos ligeros, mostró que se trataba de neutrones, es decir partículas de carga nula y de masa próxima a la del protón.

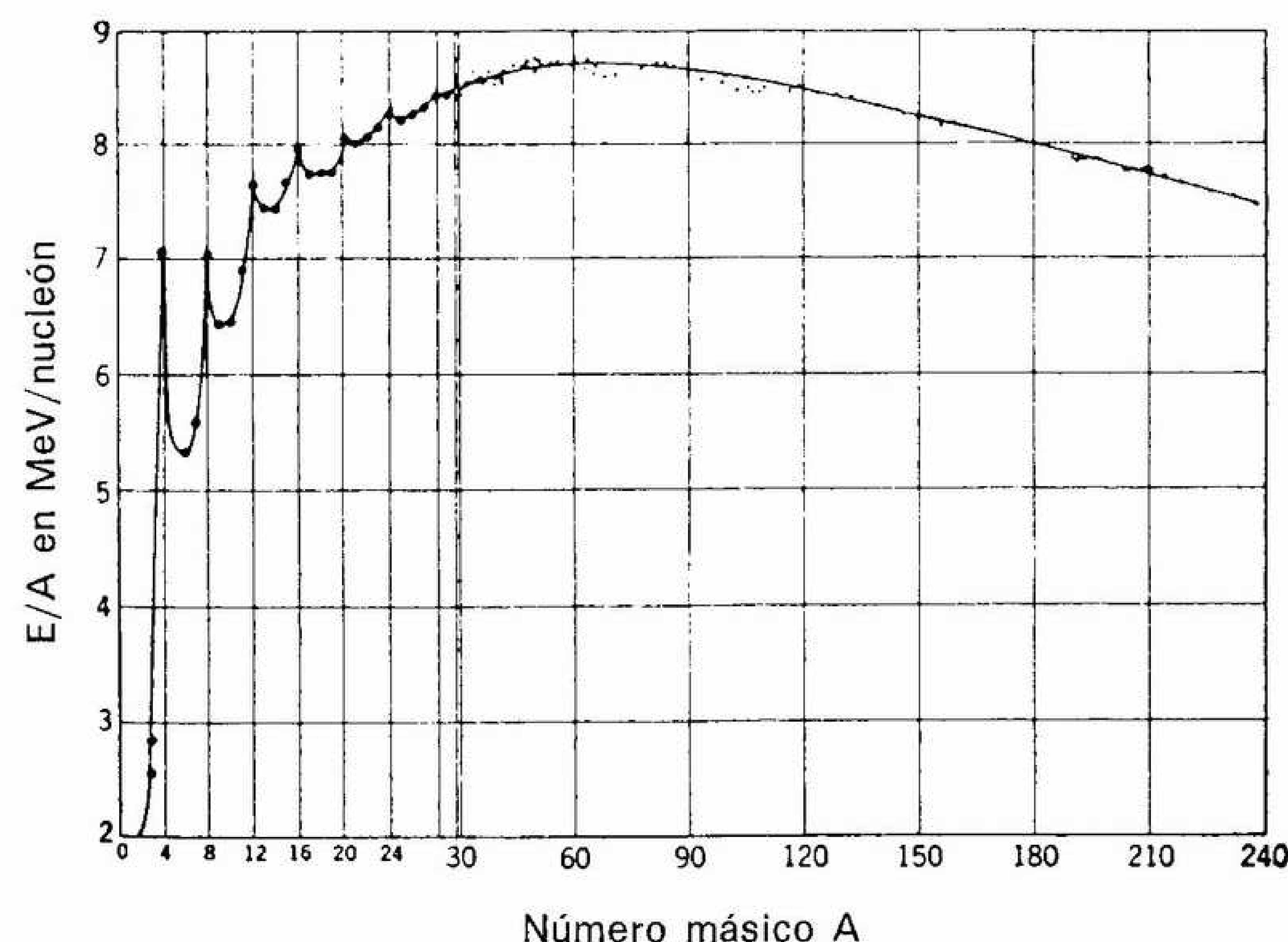
El descubrimiento del neutrón fue, por lo tanto, fruto de trabajos llevados a cabo sucesivamente en tres países diferentes: Alemania, Francia y Gran Bretaña: F. Joliot, que no estaba muy satisfecho por haber «fallado» el descubrimiento del neutrón, se complacía en hacer las dos observaciones siguientes: «Con una pared de entrada notablemente más espesa en la cámara de ionización, el efecto de proyección del núcleo nos habría escapado sin lugar a dudas. He dado siempre mucha importancia a la manera como estaba montada y realizada una experiencia. Por supuesto, es preciso partir de una idea preconcebida, pero siempre que se pueda, el experimento debe montarse para abrir la mayor cantidad posible de ventanas a lo que no ha sido previsto. Quien puede hacer lo difícil, sin duda,

puede hacer lo fácil». Añadía: «Si Chadwick ha podido demostrar con tanta rapidez que se trataba de neutrones, ha sido porque su cámara de ionización estaba conectada a un amplificador proporcional de válvulas que le permitía medir la energía que se llevaba cada núcleo observado. Esta técnica, muy moderna por entonces, no existía en el Instituto del Radio. Los experimentadores deben procurar desarrollar en sus laboratorios técnicas modernas de detección.»

I. y F. Joliot mostraron que el neutrón tenía una masa un poco superior a la del protón. Se estableció a continuación que un neutrón libre tenía radiactividad β^- y se desintegraba dando un protón, con un período de 11 minutos.

El descubrimiento del neutrón modificó sustancialmente la imagen que se tenía del núcleo, y se propusieron nuevos modelos por W. Heisenberg, F. Perrin, D. Ivanenko y E. Gapon. Había aparecido una importante dificultad con respecto al antiguo modelo que describía el núcleo como un conjunto de protones y electrones. El protón y el electrón tiene cada uno de ellos un spin 1/2, pero ¿cómo podría entonces explicarse que el spin medido por Rasetti para el $^{14}_{7}N$ fuera de 1, mientras que en el antiguo modelo este núcleo estaba constituido por 14 protones y 7 electrones, esto es, un número impar de partículas con un spin 1/2, lo que habría debido conducir a un spin nuclear total semientero? Todo se aclaraba, en cambio, si se consideraba que el núcleo sólo estaba constituido por protones y neutrones (dos variedades de una misma especie, el nucleón), como demostró W. Heisenberg durante el Consejo Solvay, en 1933. Siete protones y siete neutrones (el neutrón también tiene spin 1/2) sí pueden explicar el spin entero de ^{14}N, puesto que el número de componentes (14) es ahora un número par.

La estabilidad de los núcleos se hacía así más fácil de comprender e incluso de calcular, como veremos en el capítulo 7. La energía de enlace del núcleo se debe a las fuerzas nucleares. Puede definirse como la energía total que es preciso suministrar al núcleo para disgregarlo por completo en todos sus constituyentes, los Z protones y los N neutrones ($Z + N = A$). Se denomina a veces «defecto de masa». Puede también definirse la energía de enlace media por nucleón, que es simplemente la energía de enlace total dividida por el número total A de nucleones (véase figura pág. 75). Cabe señalar que ciertos núcleos son mucho más estables que sus vecinos, como ^4He, ^{12}C ó ^{16}O, y asimismo que la energía de enlace



Energía de enlace por nucleón, en función del número másico A. Téngase en cuenta el cambio de escala a partir de A = 30. Hacia la izquierda de la curva, los picos corresponden a los núcleos cuyo número másico es múltiplo de 4.

media por nucleón tiene un máximo alrededor de $A = 60$ y varía relativamente poco para los núcleos medios y pesados.

La variación media de la energía de enlace es muy cercana a la que Aston denominó *packing fraction* (pero de signo opuesto), y que era simplemente la diferencia entre la masa de un núcleo medida de modo experimental y su número másico A, dividido todo el conjunto por A. La curva de la figura permite predecir asimismo el balance de las reacciones nucleares.

3. UN PEQUEÑO NEUTRÓN: EL NEUTRINO

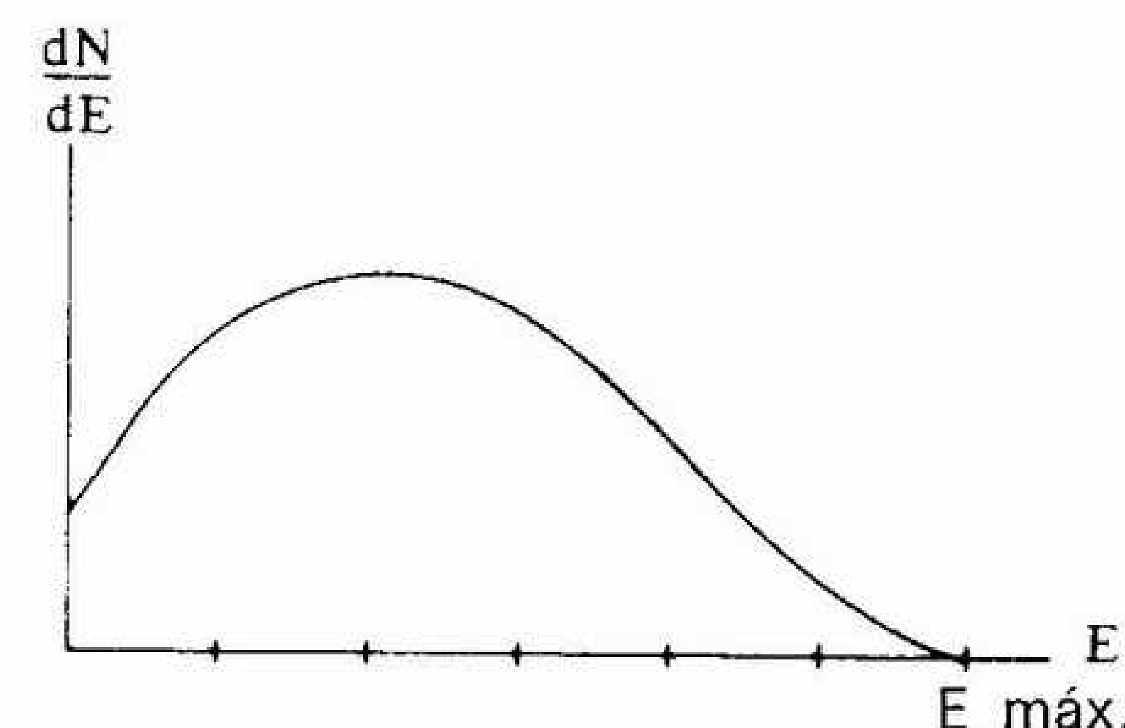
La radiactividad beta (β), estudiada desde principios de siglo, presentaba dos enigmas: J. Chadwick había observado, en 1914, que el espectro energético de los electrones era continuo, es decir que un núcleo al desintegrarse emitía rayos β de energía variable.

¿Por qué, pues, había todo un espectro cuando sólo la energía *máxima* del espectro beta parecía corresponder a la diferencia de energía entre el núcleo inicial y el núcleo final? C. D. Ellis y W. Wooster habían demostrado incluso, con un calorímetro, que la energía absorbida por unidad de partícula beta era efectivamente igual a la energía media del espectro.

Por otra parte, ¿de dónde salían esos electrones que constituían los rayos beta? Era evidente que provenían del núcleo; Marie Curie los había denominado electrones «esenciales». Pero, ¿existían ya en el interior del núcleo? Esto parecía estar en contradicción con lo que acabamos de decir acerca del núcleo, concebido como un conjunto de protones y de neutrones únicamente. Para resolver el primer enigma —para lo cual Niels Bohr estaba casi dispuesto a abandonar el principio de conservación de la energía—, Wolfgang Pauli sugirió una «cura de caballo». Expuso su idea en primer lugar en una carta abierta, escrita desde Zurich el 4 de diciembre de 1930 y dirigida a los «Señores y Señoras radiactivos», designando así a cierto número de colegas que debían reunirse en Tubinga, Alemania. Propuso la existencia de una nueva partícula neutra, de masa muy pequeña, y emitida al mismo tiempo que el electrón. La denominó neutrón, pero cuando el «verdadero» neutrón fue descubierto, el físico italiano E. Fermi, de acuerdo con Pauli, lo denominó neutrino (neutrón pequeño, en italiano). El neutrino, que tendría un spin 1/2, como el electrón, pero cuya masa sería muy pequeña incluso nula, como la del fotón —como señaló Francis Perrin— y desprovisto de carga eléctrica, sería muy poco interactivo y por tanto extremadamente penetrante y especialmente difícil de observar. De hecho, no se observó directamente, de forma experimental, hasta después de la Segunda Guerra Mundial, casi veinticinco años más tarde, por Reines y Cowan en EE.UU.

Pauli presentó su idea de neutrino de una manera más precisa, en ocasión del Consejo Solvay de 1933.

Menos de tres meses después, una tarde, durante unas vacaciones de invierno en la nieve, E. Fermi sentado en la cama de su habitación, en un pequeño hotel de los Dolomitas, explicaba a sus jóvenes colaboradores, de vacaciones con él, su nueva teoría de la radiactividad beta. Era la primera explicación racional de la emisión beta: la transformación de un neutrón en protón, con emisión simultánea de un electrón y de un neutrino, era tratada de forma similar a la emisión de un cuanto de luz (fotón) por el átomo. Electrón y neutrino se crean al mismo tiempo que se emiten,



Ejemplo de espectro continuo de rayos β calculado por E. Fermi.

conservándose la energía total. En el núcleo final, un protón ocupa entonces el lugar ocupado inicialmente por un neutrón. Estas ideas eran tan nuevas —como explicó después E. Amaldi— que el editor de la revista inglesa *Nature* rehusó publicarlas; aparecieron en *Zeitschrift fur Physik*, en marzo de 1934. La radiactividad beta era la manifestación de un nuevo tipo de interacción, que hoy se denomina interacción débil. Fermi había conseguido dar razón de la forma de los espectros beta y también explicar la gran variedad de períodos de semidesintegración observados.

4. ALGUNOS PROTAGONISTAS

Paul Adrien Maurice Dirac

P. A. M. Dirac nació en Bristol, en 1902.

Después de cursar estudios de ingeniero eléctrico en Bristol, Dirac fue a estudiar en Cambridge, a partir de 1925. Contribuyó de forma notable al desarrollo de la mecánica cuántica, y logró formular, en 1928, la ecuación relativista del electrón. Esta ecuación, que lleva su nombre, implica la existencia de materia y de antimateria, de la que Dirac predijo las principales propiedades. La ecuación fue confirmada de manera espectacular con el descubrimiento del electrón positivo por Anderson, en 1932. Las partículas de spin 1/2 obedecen la estadística de Fermi-Dirac.

En 1933, Dirac recibió el premio Nobel de Física.

De 1932 a 1969, P. A. M. Dirac fue profesor de matemáticas en la Universidad de Cambridge.

Su libro *Los principios de la mecánica cuántica* ha constituido la obra básica de generaciones de físicos teóricos.

En 1937, contrajo matrimonio con Marguerite Wigner, hermana del eminente físico norteamericano, de origen húngaro, Eugène Wigner.

Carl David Anderson

Nacido en Nueva York, en 1905, cursó estudios en el Instituto de Tecnología de California (Caltech), en Pasadena, EE.UU.

Ha dedicado lo esencial de su actividad al estudio de la radiación cósmica. Ha participado en diversas ascensiones estratosféricas para el estudio de esta radiación; construyó, junto con Millikan, una gran cámara de Wilson vertical, con la que descubrió en 1932, el electrón positivo. Por tal descubrimiento le fue otorgado, en 1936, el premio Nobel de Física.

En 1937, la misma técnica de la cámara de Wilson, aplicada al estudio de los rayos cósmicos, le permitió, en colaboración con S. H. Neddermeyer, descubrir una partícula que al principio se denominó mesotrón o mesón μ, puesto que se creía que se trataba del mesón, vehículo de la interacción fuerte, postulado por Yukawa. Hoy se denomina lepton μ, o muón; es una especie de electrón pesado, que, como el electrón, sólo interacciona con otras partículas por interacción electromagnética y por interacción débil.

En 1947-1949, C. D. Anderson, que proseguía sus investigaciones en el Caltech, midió, con su equipo, el espectro de electrones de desintegración del muón.

James Chadwick

J. Chadwick nació en Manchester el 20 de octubre de 1891.

Realizó sus estudios en su ciudad natal y los terminó, bajo la dirección de Rutherford, en la Universidad de Manchester. Mostró que los rayos β, emitidos por los núcleos radiactivos, forman un espectro continuo de energía. J. Chadwick obtuvo una beca para investigar en Alemania, con Hans Geiger, pero sobrevino la Primera Guerra Mundial y estuvo internado hasta el final de las hostilidades.



James Chadwick.

En 1919, entró en el laboratorio Cavendish, en Cambridge, del que Rutherford acababa de ser nombrado director. Realizó allí diversos trabajos experimentales. En 1932, después de que F. e I. Joliot-Curie observaran la proyección de núcleos de hidrógeno por la radiación de Bothe y Becker, Chadwick prosiguió estos experimentos y demostró, muy rápidamente, que esta radiación



Wolfgang Pauli.



John Cockroft y George Gamow *(a la derecha)* trabajando juntos, en diciembre de 1933.

estaba constituida por neutrones. Poco tiempo después de este descubrimiento, estudió, con N. Goldhaber, la fotodesintegración del deuterio, en un protón y un neutrón, por rayos γ enérgicos.

Recibió, en 1935, el premio Nobel de Física, mientras era profesor de la Universidad de Liverpool.

En 1940, Chadwick llamó la atención de las autoridades británicas sobre las implicaciones prácticas del descubrimiento de la fisión nuclear. Posteriormente, dirigiría el equipo británico que participó en la construcción de la bomba atómica en Los Álamos. En 1948, Chadwick regresó a la Universidad de Cambridge.

Murió en esta ciudad, en 1974.

Wolfgang Pauli

W. Pauli nació en Viena, el 25 de abril de 1900. Era hijo de un profesor de química médica.

Estudió en Munich, con Sommerfeld, que le pidió que redactara, cuando apenas tenía 21 años, una gran síntesis sobre la relatividad, para una enciclopedia; según la opinión de Einstein, era uno de los mejores artículos que se habían escrito sobre el tema.

A continuación, fue ayudante de Max Born, en Gotinga, y después, en 1923, profesor en la Universidad de Hamburgo y, en 1928, en la Escuela Politécnica de Zurich. Pasó frecuentes temporadas en el Instituto de Física Teórica de Copenhague. En 1925, imaginó y formuló el principio de exclusión que lleva su nombre y postuló, en 1930, la existencia de una nueva partícula neutra, de masa muy pequeña, el neutrino, para explicar la forma del espectro β sin renunciar al principio de conservación de la energía.

En 1945 obtuvo, por el conjunto de sus trabajos, el premio Nobel de Física.

W. Pauli tenía un carácter impaciente y chispeante, lleno de humor; podía ser muy incisivo. No dudaba en tratar de imbécil a cualquiera, incluyendo a Niels Bohr. Se cuenta que un día, su amigo y colega P. Ehrenfest, veinte años mayor que él, le dijo con franqueza que prefería sus escritos a su persona. Pauli le respondió en el acto y en los mismos términos que él experimentaba unos sentimientos exactamente inversos, en lo que se refería a Ehrenfest y a su obra.

Pauli dio clases en Princeton, EE.UU. de 1935 a 1954, antes de regresar a Zurich, donde murió el 15 de diciembre de 1958.

5. EL DESCUBRIMIENTO

1. ¿ELECTRONES POSITIVOS DE TRANSMUTACIÓN?

Frédéric e Irène Joliot habían estado muy cerca de descubrir el neutrón. El interrogante que se abría ahora era saber si serían asociados al premio Nobel que, sin ninguna duda, se otorgaría a J. Chadwick. Se cuenta que Rutherford habría comentado: «Sería mejor esperar un año antes de dar el premio a Chadwick. Me extrañaría mucho que los dos jóvenes franceses no hicieran ningún descubrimiento de aquí a entonces.»

El período 1931-1934 fue, en efecto, el más intenso y el más fructífero para el trabajo en común de la pareja de físicos del Instituto del Radio. En primer lugar habían estudiado atentamente la radiación del polonio, después habían puesto a punto unos procedimientos de preparación de fuentes de polonio muy intensas, concentradas en pequeñas superficies, a partir de pequeñas cantidades de radio D (22 años de período) pacientemente acumuladas por Marie Curie y por ellos mismos. Consiguieron depositar hasta 200 milicuries de Po sobre superficies de 20 mm^2; pero tales fuentes debían ser renovadas periódicamente, ya que el período del ^{210}Po es de 138 días (unos cuatro meses y medio). Frédéric Joliot escribió más tarde en su autobiografía: «Se verá más adelante hasta qué punto disponer de tales fuentes ha sido importante para nosotros: el estudio de los extraños fenómenos que tienen lugar cuando los rayos alfa atraviesan la materia se ve muy facilitado cuando se utilizan fuentes intensas de rayos alfa. Entre los radioelementos, el polonio presenta la gran ventaja de emitir, casi exclusivamente, esa radiación». La energía de los rayos α de ^{210}Po es de 5,3 millones de electronvoltios.

En 1931, F. Joliot desarrolló un nuevo modelo de cámara de Wilson, de presión variable, que podía situarse en un campo magnético, y que les fue de gran utilidad. Después del descubrimiento de Chadwick, lo esencial de los esfuerzos de los dos físicos se dedicó al estudio de la producción de neutrones y, después, de electrones positivos. Todas las publicaciones comunes iban firmadas Irène Curie y Frédéric Joliot.

Sus trabajos de 1932 versaron, en primer lugar, sobre nuevas pruebas de la emisión de neutrones, sobre las condiciones de tal emisión, y sobre la radiación gamma —y los electrones— que las acompañan. En efecto, F. e I. Joliot-Curie estaban convencidos, con razón, de que la radiación de Bothe y Becker comprendía también, además de neutrones, radiación γ capaz de proyectar electrones enérgicos. Se esforzaron en determinar las reacciones de producción en juego y medir las funciones de excitación y la energía de la radiación alfa a partir de la cual aparecían los neutrones (umbrales de producción). A tal objeto, utilizaron el siguiente dispositivo: la fuente de Po se sitúa en la parte superior de una cámara que contiene un gas cuya presión puede hacerse variar, y cuya tapa inferior tiene la forma de un casquete esférico; se adhiere una pequeña cantidad del elemento a irradiar en la superficie interna de este casquete. El conjunto se coloca en una cámara de ionización llena de metano CH_4 o de butano C_4H_{10}. Estos gases, gracias a su gran número de átomos de hidrógeno, mejoran mucho la detección de los neutrones. El umbral de energía no era fácil de medir con precisión, a causa del efecto de la barrera de potencial que se oponía a la penetración de las partículas alfa en el núcleo. Midieron así los umbrales de emisión relativamente elevados de los neutrones en el caso del flúor y del aluminio, ya estudiados por Bothe y Becker. Frédéric e Irène Joliot-Curie se preguntaban sobre la reacción nuclear involucrada en el caso del aluminio; entre diferentes hipótesis, especularon sobre la posibilidad de una reacción



$$^{27}Al + \alpha \rightarrow {}^{30}P + n$$

^{30}P sería entonces un isótopo aún desconocido del fósforo, hipótesis que les parecía plantear dificultades. Pero no fueron más lejos, porque, para ellos, como para todos los físicos de la época, el núcleo final resultante de una reacción nuclear sólo podía ser un núcleo estable, como en la reacción



$$^{9}Be + \alpha \rightarrow {}^{12}C + n$$

A partir de cierto número de clichés tomados en la cámara de Wilson, los dos jóvenes investigadores, entre los electrones observados, habían señalado «ciertas trayectorias desviadas en sentido contrario por el campo magnético», «cierto número de electrones de energía cuántica elevada que se dirigían hacia la fuente». Después del descubrimiento del positrón por Anderson, esta observación quedaba explicada: se trataba de electrones positivos que debían de ser producidos por la radiación gamma. Frédéric e Irène Joliot se lanzaron con energía en esta nueva dirección: estudiar el modo de formación de los e^+, su absorción, verificar las diferentes propiedades predichas por la teoría de Dirac. Establecieron que los rayos gamma enérgicos de los radioelementos naturales —en especial los de Th C″— y los emitidos en ciertas reacciones nucleares productoras de neutrones, eran absorbidos y «se materializaban», es decir, daban un par $e^+ e^-$. Confirmaron que esta materialización sólo aparecía en el caso de energías de radiación gamma superiores a 1,02 MeV, lo que corresponde a la masa de un par $e^+ e^-$. J. Chadwick, P. Blackett y Occhialini, así como L. Meitner y K. Philipp establecieron que esta absorción se incrementaba con la energía y que aumentaba mucho cuando se empleaba un absorbente pesado con alto valor de Z en lugar de un absorbente ligero; por ejemplo el plomo, en lugar del aluminio o del cobre. Los dos físicos del Instituto del Radio midieron también las energías de los electrones y positrones mediante su radio de curvatura en el campo magnético de la cámara de Wilson y las encontraron comparables. En muchos clichés, pudieron observar el par completo; ambas trayectorias de electrones, uno positivo y otro negativo, procedían del mismo punto de la pastilla de plomo; en algunos casos, muy raros, el par tenía su origen en el gas de la cámara (véase cliché página 86).

Establecieron también, experimentalmente, el fenómeno de «materialización interna»: el fotón se convertía en un par $e^+ e^-$ en el propio núcleo que lo emitía: éste debía ser el caso de la radiación γ de 5 MeV de la reacción.



$$^{9}Be + \alpha \rightarrow {}^{12}C + n + \gamma\ (e^+\ e^-)$$

La teoría de este efecto fue establecida poco tiempo después por Nedelsky y R. Oppenheimer, en EE.UU.

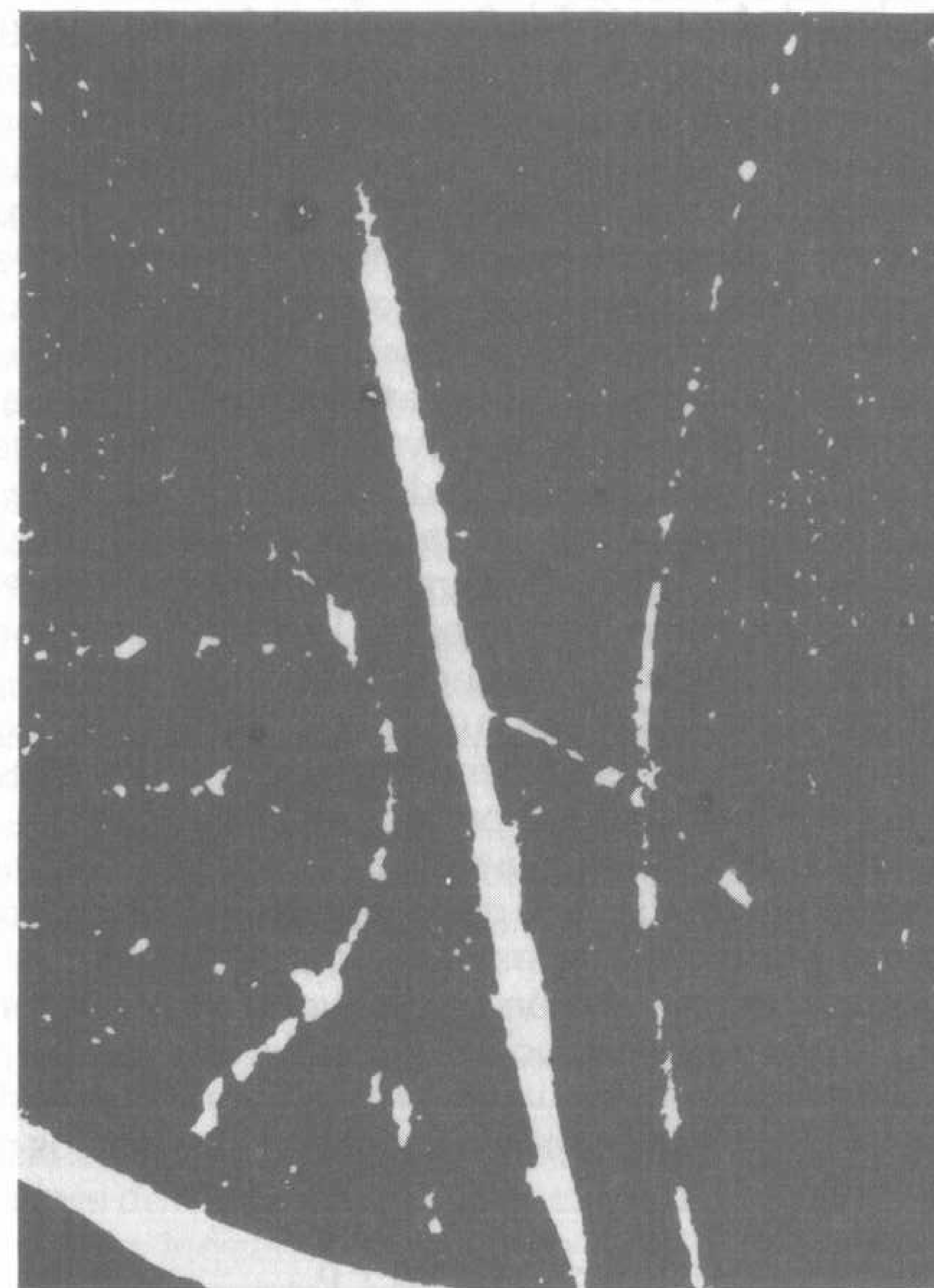
En junio de 1933, los dos físicos quisieron estudiar de nuevo la radiación poco intensa que acompañaba los rayos alfa del polonio, preguntándose si no existiría un espectro continuo de rayos β de



Cliché de un par de electrones positivo-negativo producido en el gas de la cámara de Wilson por la materialización de un rayo γ (I. Curie y F. Joliot).

intensidad muy débil, que habría podido indicar una pequeña ramificación de desintegración del polonio hacia un isótopo del elemento 85, entonces desconocido. En efecto, ciertos núcleos, a condición de que el balance energético lo permita, se desintegran unas veces según una vía, y otras según otra vía, en proporciones diferentes.

Para observar esta radiación β, F. e I. Joliot-Curie colocaron,

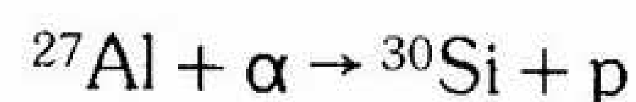


Cliché de trayectorias de un electrón positivo (línea fina, a la derecha) y de un protón (línea gruesa, a la izquierda) de transmutación del aluminio irradiado por partículas α (I. Curie y F. Joliot, junio de 1933).

contra la ventana dispuesta en la pared de la cámara de Wilson, una potente fuente de polonio cubierta por una hoja de aluminio destinada a detener la radiación alfa; la cámara se encontraba en un campo magnético de 400 gauss que, al curvar los electrones, permitía conocer el signo de su carga y medir su energía. En la oscuridad, los dos físicos se inclinaban sobre la cámara, ante los dos objetivos del aparato fotográfico: durante la breve iluminación de

la cámara por la acción de los tubos de incandescencia a sobretensión, podía verse la formación de finas gotitas de vapor de agua que materializaban las trayectorias, que destacaban en blanco por encima del fondo negro de la parte superior del émbolo. El ruido del descenso del émbolo, que provocaba la expansión de gas se repetía cada cuatro minutos. Primera expansión: sorpresa, aparecía un electrón positivo; segunda expansión: un electrón positivo y dos electrones negativos... y así sucesivamente; de cuando en cuando, aparecía también un protón de la reacción de transmutación (α, p). ¿Se trataba, también aquí de una materialización interna? Pero había demasiados electrones positivos. Cuando sustituyeron la lámina de aluminio por una lámina de plata o parafina, desaparecieron los electrones positivos; por tanto, se producían en el aluminio y no procedían del polonio. También aparecían e^+ cuando se reemplazaba el aluminio por el boro. Los electrones positivos formaban todo un espectro de energía que se extendía, para el aluminio, hasta unos 3 MeV; en cuanto a los electrones negativos, tenían una energía netamente menor: pero el aspecto del espectro continuo de los e^+ no alertó al principio a F. e I. Joliot.

Los Joliot-Curie dedujeron la siguiente conclusión de los resultados del experimento: «Se sabe que el aluminio o el isótopo 10 del boro emiten, por la acción de los rayos α, protones de transmutación... *A veces la transmutación se efectuaría con emisión de un neutrón y un electrón positivo en lugar de un protón...* Cabría admitir la hipótesis según la cual un protón estaría constituido por un neutrón y un electrón positivo.» Escribieron así las dos reacciones del aluminio:



$$^{27}Al + \alpha \rightarrow {}^{30}Si + p$$



$$^{27}Al + \alpha \rightarrow {}^{30}Si + n + e^+$$

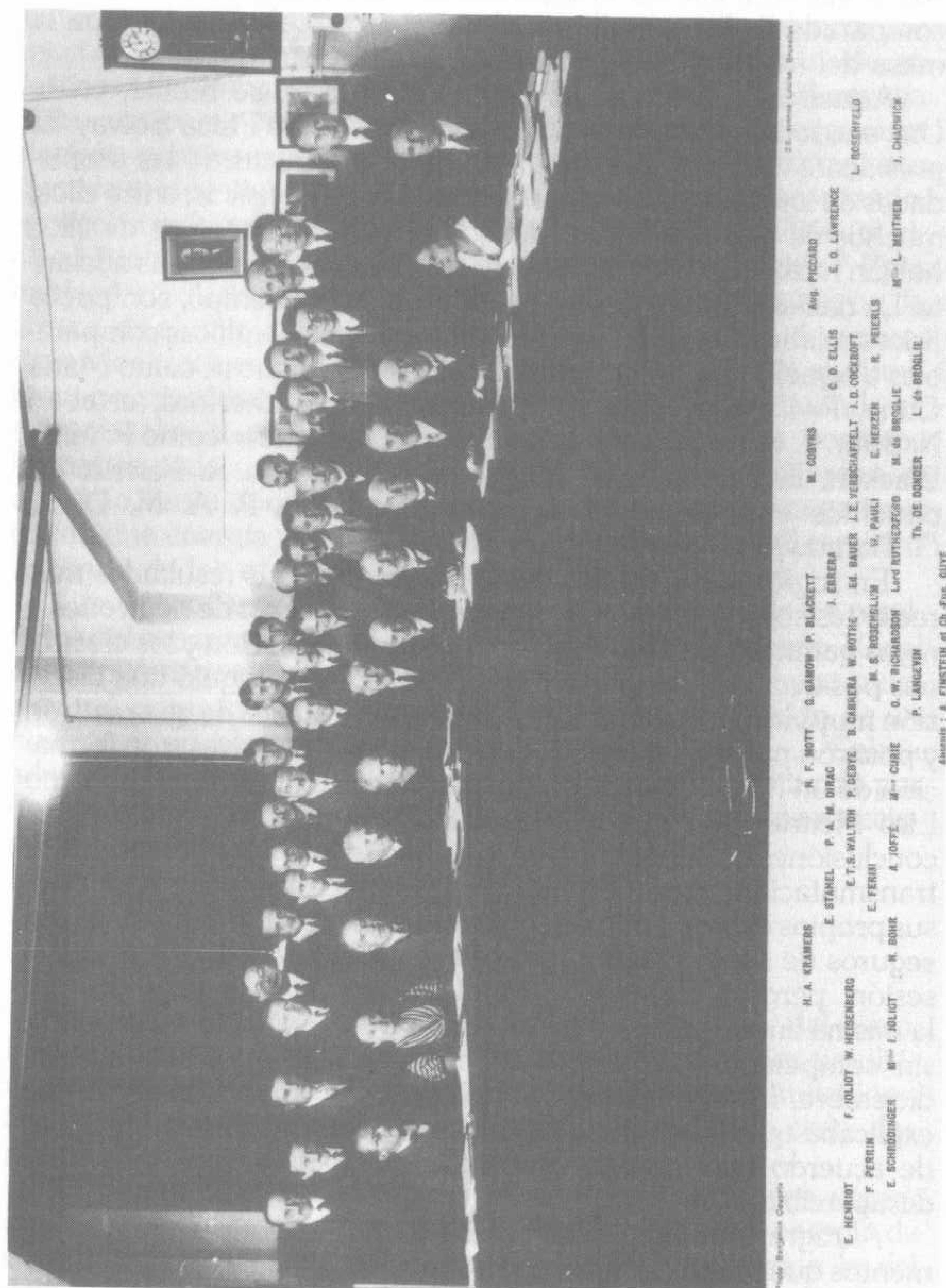
El núcleo ^{30}Si era un isótopo bien conocido y estable del silicio. Denominaron a estos positrones, que supusieron emitidos simultáneamente a los neutrones «electrones positivos de transmutación». Se encontraba aproximadamente un e^+ emitido por cada dos millones de partículas alfa incidentes.

Según su hipótesis, el protón era complejo y creyeron entonces, a causa del defecto de masa que correspondía a la energía de enlace, que el neutrón debía tener una masa superior a la del protón y no al revés, como se había admitido hasta entonces. Para que esto pudiera ser cierto, sugirieron que la reacción de producción de neutrones en el boro tenía lugar sobre el isótopo ^{10}B, y no sobre ^{11}B, como se había supuesto con anterioridad. Del balance comparado de las reacciones, obtuvieron un valor nuevo para la masa del neutrón, muy próximo al que hoy se admite.

Aquel año, desde el 22 al 29 de octubre, se reunió, en la Universidad de Bruselas, el Séptimo Consejo de Física Solvay. El presidente era Paul Langevin; el tema: «La estructura y las propiedades de los núcleos atómicos». Participaban 40 físicos; entre ellos, muchos de aquellos cuyos trabajos hemos descrito. Seis de ellos habían recibido un premio Nobel y catorce lo recibirían más adelante. La naciente física nuclear contaba, en aquel tiempo, con pocos físicos relativamente. Hoy ya no hay reuniones científicas comparables a aquella. Se encontraban en ella los «antiguos», como Marie Curie, P. Langevin, O. W. Richardson, E. Rutherford; estaban N. Bohr, E. Schrödinger y L. de Broglie, y «jóvenes», como P. M. S. Blackett, E. Fermi, E. O. Lawrence, W. Pauli o R. Peierls; los ponentes eran J. D. Cockroft, J. Chadwick, P. A. M. Dirac, G. Gamow, W. Heisenberg y F. e I. Joliot.

En su ponencia, estos últimos presentaron sus resultados más recientes sobre los neutrones, sobre la producción de neutrones y rayos gamma, sobre los electrones de materialización y los electrones positivos de transmutación. A su exposición siguió una discusión muy viva; F. Perrin emitió la hipótesis profética de que neutrón y positrón podían ser emitidos en dos etapas sucesivas, con formación de un núcleo intermediario; pero otros eran escépticos, como Lise Meitner que intervino repetidas veces para impugnar las conclusiones de la ponencia en lo que se refería a los positrones de transmutación, indicando que ella no había observado nunca, en sus propios experimentos, neutrones asociados. F. e I. Joliot, si bien seguros de sus resultados, estaban desmoralizados al terminar la sesión, pero N. Bohr y W. Pauli les animaron a proseguir en la misma línea. Pudieron así continuar trabajando tranquilamente, sin competencia, durante tres meses. En el curso del mes de diciembre, Lise Meitner envió una nota de corrección en la que explicaba que, después de repetir sus experimentos, estaba ahora de acuerdo con los dos físicos franceses, pero esta nota pasó desapercibida.

Al regreso de Bruselas, Frédéric e Irène discutieron los experimentos que serían necesarios para precisar el origen y las condiciones de emisión de los electrones positivos. Pero F. Joliot deseaba también verificar una previsión esencial de la teoría de Dirac: el



1. EL CONSEJO SOLVAY

Ernest Solvay (1836-1922) era un industrial belga, ingeniero químico, que había ganado una fortuna con el procedimiento de preparación del carbonato de sodio, que había desarrollado y patentado. Un día, desarrolló una teoría física personal y deseó tener una discusión sobre el particular con expertos. Walther Nernst le propuso entonces patrocinar una conferencia de físicos, en la que los participantes podrían discutir libremente los problemas más actuales de su campo. M. Planck estuvo de acuerdo con el proyecto. Se hizo llegar una invitación, acompañada de un reembolso de los gastos, a cierto número de físicos, en el transcurso del verano de 1911. La reunión tuvo lugar en el hotel Métropole de Bruselas. El tema de este primer Consejo Solvay fue: teoría de la radiación y cuantos. Lorentz fue el presidente y M. de Broglie, F. A. Lunderman y Victor M. Goldschmidt los secretarios. Entre los participantes se emcontraban Marie Curie, Albert Einstein, Paul Langevin, Walther Nernst, Jean Perrin, Henri Poincaré, Ernest Rutherford y Arnold Sommerfeld. No se hablaba allí una única lengua. Hubo rivalidades, pero los participantes estaban unidos por la pasión común por la ciencia. Fue necesaria, sin embargo, toda la autoridad de Lorentz, y su tacto incomparable, para mantener en las discusiones, muy vivas, una línea directriz. Albert Einstein llamaba, en privado, a la reunión de este consejo: «el aquelarre de las brujas». Los seis consejos de física siguientes, presididos por Lorentz hasta 1927, y, a partir de 1930, por Paul Langevin, fueron:
1913, 2.° Consejo Solvay: estructura de la materia. 1921, 3.er Consejo: átomos y electrones. 1924, 4.° Consejo: conductividad eléctrica de los metales. 1927, 5.° Consejo: electrones y fotones. 1930, 6.° Consejo: magnetismo. El 7.° Consejo de Física Solvay, al que se refiere este libro, tuvo lugar, en 1933 y trató de la estructura y las propiedades de los núcleos atómicos.

destino de los positrones al terminar su recorrido, su aniquilación. Para hacerlo, utilizó como fuente los e^+ «de transmutación» emitidos por una doble lámina de aluminio que contenía, «como un bocadillo» una intensa fuente de polonio. Para concentrar los positrones sobre un radiador que los detuviera, empleó el método de la trocoide que había sido introducido por J. Thibaud: los electrones se enrollaban en el campo de fuga de un electroimán, alrededor de sus piezas polares; después del radiador, una serie de pantallas, de espesor variable, y un contador de hilo Geiger-Müller

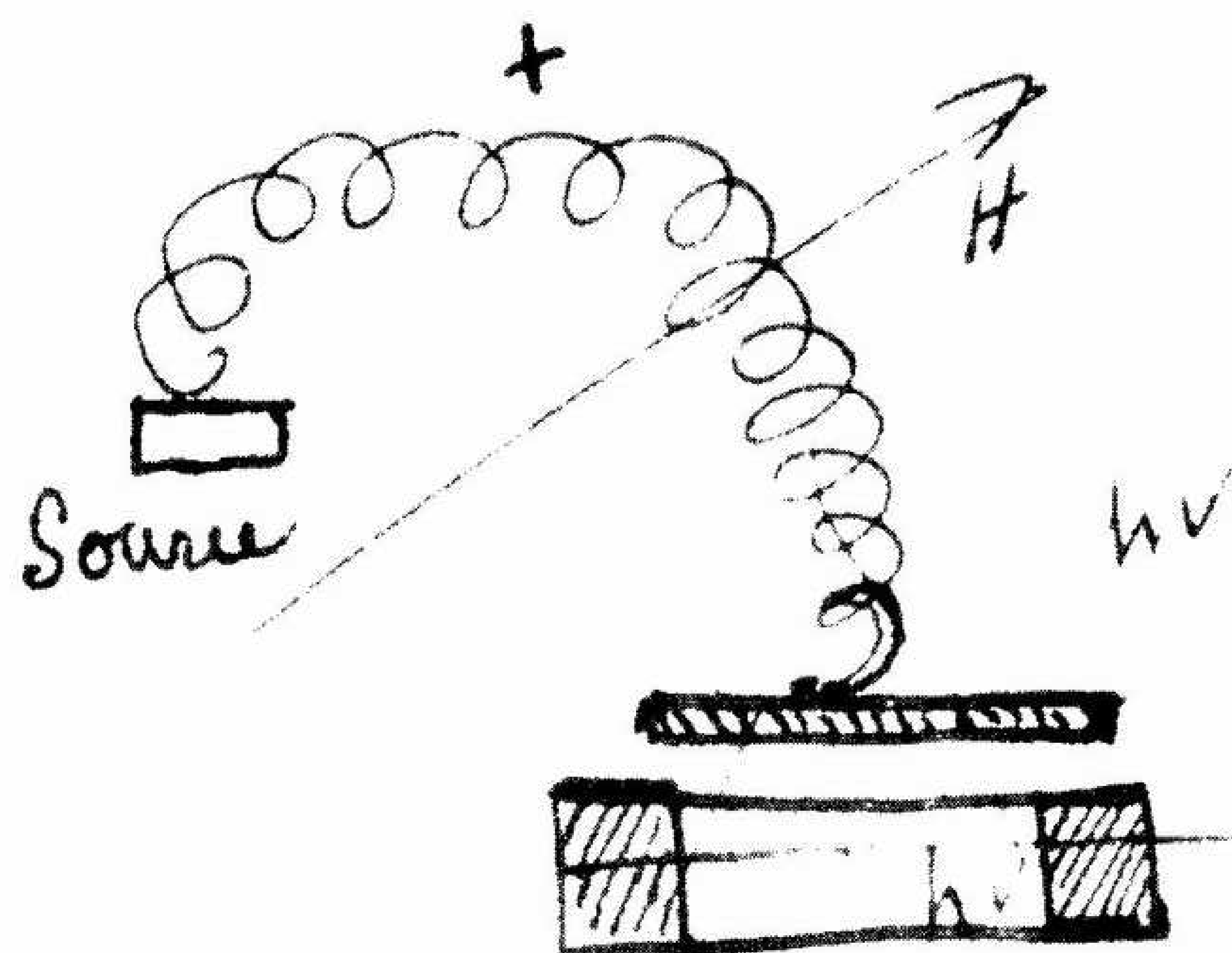
◄Los participantes en el 7.° Consejo Solvay (Bruselas, 1933).



Photo Benjamin Couprie — 28, avenue Louise, Bruxelles

H. A. KRAMERS N. F. MOTT G. GAMOW P. BLACKETT M. COSYNS Aug. PICCARD
E. STAHEL P. A. M. DIRAC J. ERRERA C. D. ELLIS E. O. LAWRENCE
E. HENRIOT F. JOLIOT W. HEISENBERG E. T. S. WALTON P. DEBYE B. CABRERA W. BOTHE Ed. BAUER J. E. VERSCHAFFELT J. D. COCKROFT L. ROSENFELD
F. PERRIN E. FERMI M. S. ROSENBLUM W. PAULI E. HERZEN R. PEIERLS
E. SCHRÖDINGER Mme I. JOLIOT N. BOHR A. JOFFÉ Mme CURIE O. W. RICHARDSON Lord RUTHERFORD M. de BROGLIE Mlle L. MEITNER J. CHADWICK
P. LANGEVIN Th. DE DONDER L. de BROGLIE

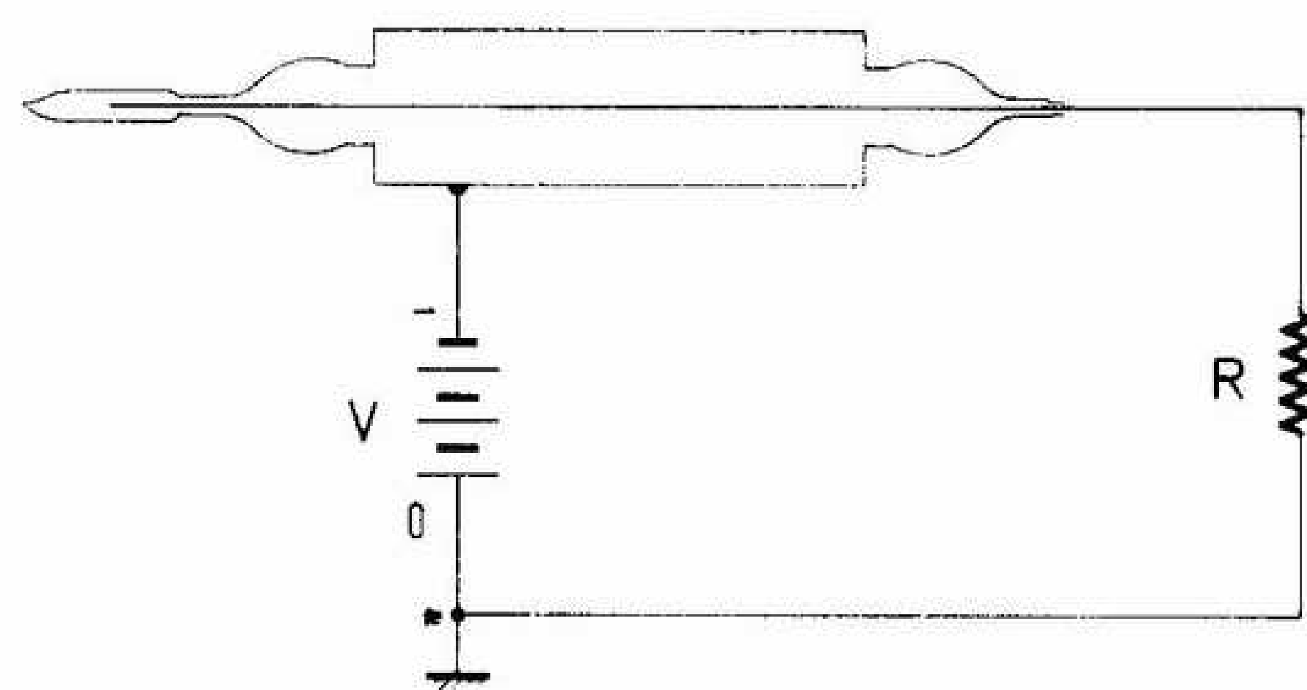
Absents : A. EINSTEIN et Ch.-Eug. GUYE



Dibujo de una trayectoria trocoidal de un positrón en el interior de un campo magnético (cuaderno de laboratorio, 12 de diciembre de 1933). *A la derecha,* en la parte inferior, un contador Geiger-Müller está situado debajo de una pantalla radiador.

2. EL CONTADOR GEIGER-MÜLLER

La idea de emplear un contador, que permitiera contar el número de partículas que lo atraviesan, es antigua en la historia de la radiactividad. Rutherford y Geiger, en 1908, construyeron un primer modelo de contador para detectar las partículas α. Este instrumento fue perfeccionado por Geiger en 1912;



Contador de Geiger-Müller y su montaje.

permitía contar el número de partículas α con una eficacia próxima al 100 %. Era un receptáculo que contenía aire u otro gas a baja presión, cerrado por una fina ventanilla, que comprendía en su interior una pequeña varilla terminada en punta o en una pequeña bola. En 1928 Geiger, ayudado por el joven físico Müller, creó el contador Geiger-Müller, que adoptó la forma de un tubo metálico, y que en su centro, a lo largo del eje, comprendía un hilo metálico delgado, aislado del cilindro exterior mediante vidrio. El contador se llena de una mezcla gaseosa, a presión reducida. El filamento se lleva a una tensión positiva respecto al tubo, y, por consiguiente, atrae a los electrones. El potencial aplicado al contador está próximo a la tensión necesaria para que se produzca una descarga disruptiva. Cuando se crea un par de iones debido a una partícula ionizante en el gas del tubo, el electrón del par de iones se dirige hacia el filamento y, debido a la geometría cilíndrica, se acelera fuertemente cerca del hilo, y arranca en colisiones sucesivas una cascada de nuevos electrones a su paso. Se obtiene una pequeña descarga que se propaga a lo largo del filamento, y da, por consiguiente, una señal eléctrica importante. El contador está unido, a través de un pequeño amplificador, a un sistema numerador que cuenta los impulsos eléctricos uno por uno. La ventaja del contador Geiger-Müller es su capacidad de contar uno por uno cada par de iones liberados en el gas. Su eficacia para las partículas β (electrones) es muy próxima al 100 %.

destinado a contar los fotones. F. Joliot encontró, como predecía Dirac, que los electrones positivos, detenidos en la materia, se aniquilaban con electrones negativos, y daban, cada vez, dos fotones de 510 KeV cada uno. Los valores medidos en este experimento eran de 485 ± 60 KeV para la energía y de $2{,}3 \pm 0{,}7$ para el número de fotones, el error relativamente importante de este último valor se debía a la baja eficacia del contador de fotones. Estos resultados fueron presentados en la sesión de la Academia de Ciencias del 18 de diciembre; en la misma sesión, fueron presentados otros experimentos emprendidos de modo independiente por J. Thibaud sobre el mismo tema.

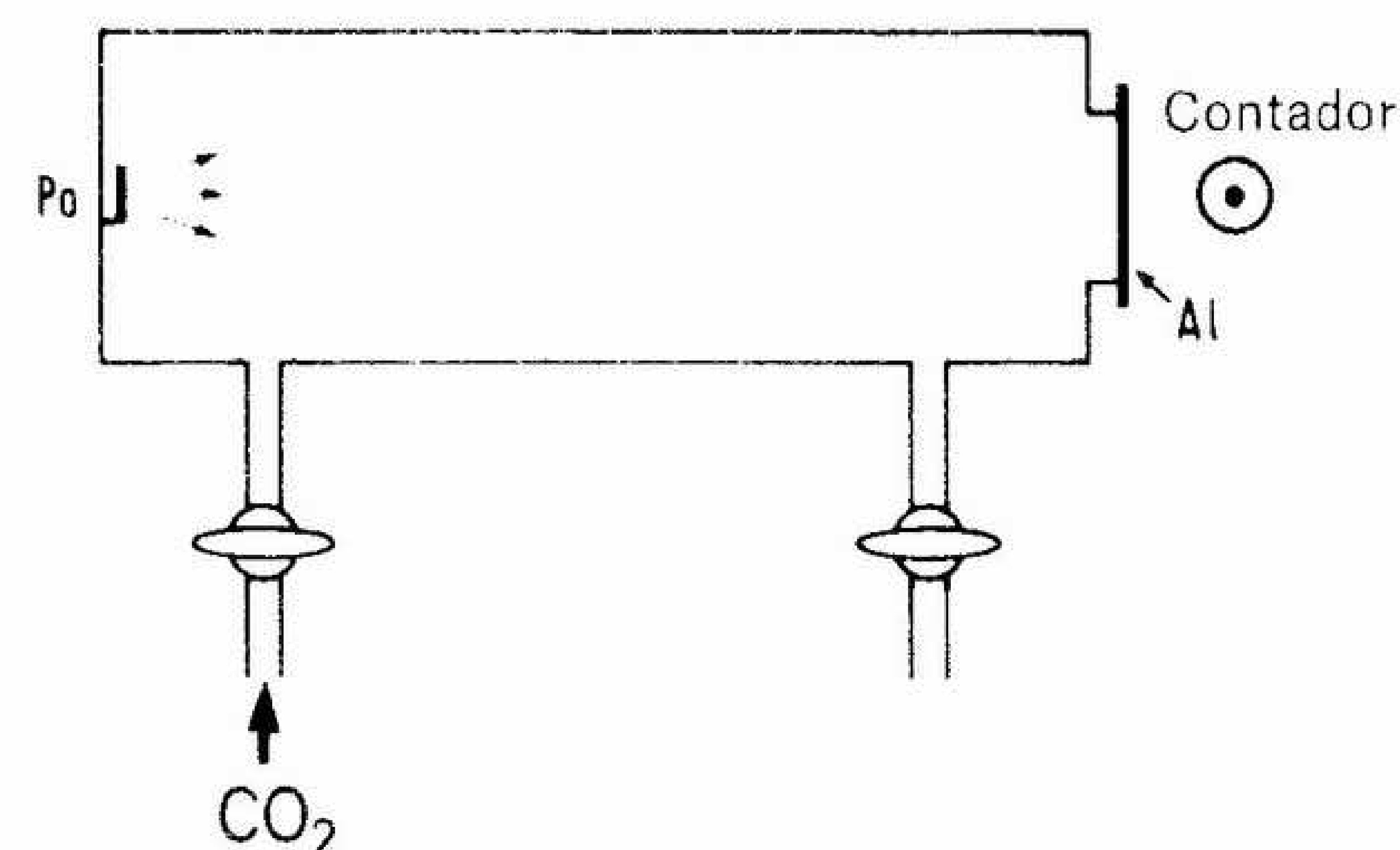
2. UN NUEVO TIPO DE RADIACTIVIDAD

A partir de mediados de noviembre, Frédéric e Irène Joliot empezaron a realizar el programa decidido al regreso del Consejo Solvay. Trataban de verificar si los neutrones y los electrones positivos de transmutación eran emitidos simultáneamente en una

misma reacción nuclear, puesto que aparecían ambos a partir de un mismo valor umbral de energía. Se proponían medir sucesivamente el umbral correspondiente a los neutrones y el umbral correspondiente a los positrones. Para ello, iban a estudiar la emisión de los electrones positivos y de los neutrones por el aluminio irradiado por las partículas alfa del polonio, cuya energía hacían variar por disminución de su velocidad en un gas. La emisión de los positrones fue reexaminada en primer lugar en una cámara de Wilson situada en un campo magnético. Después, en diciembre, verificaron el umbral de energía para los neutrones, que ya habían medido algunos meses antes. Para ello, volvieron a utilizar el dispositivo que hemos descrito más arriba: una cámara llena de un gas de presión variable que tenía dispuesta, en la parte superior, la fuente de polonio, en la parte inferior el aluminio, y todo el conjunto encima de una cámara de ionización de paredes parafinadas, llena de butano, que permitía detectar los neutrones con una eficacia conveniente. En esta ocasión, la cámara de ionización estaba conectada a un amplificador de impulsos.

Era sin duda la tarde del jueves 11 de enero de 1934[1]. Había helado en la madrugada de ese día y, a la mañana siguiente, caía la lluvia sin cesar. Frédéric Joliot estaba solo en su laboratorio del Instituto del Radio. Empezaba una nueva serie de mediciones del programa previsto para determinar el umbral de aparición de los positrones, es decir, la energía mínima de las partículas alfa que provocaban su emisión. La experiencia —tal como la explicó F. Joliot en su curso del College de France de 1948-1949— estaba montada de la forma siguiente: contra el fondo interior izquierdo de una cámara, que podía ser vaciada por completo o se podía llenar de gas carbónico CO_2 hasta la presión atmosférica, se había dispuesto una fuente intensa de 60 milicuries de polonio; a la derecha la ventana de la cámara estaba constituida por la hoja de

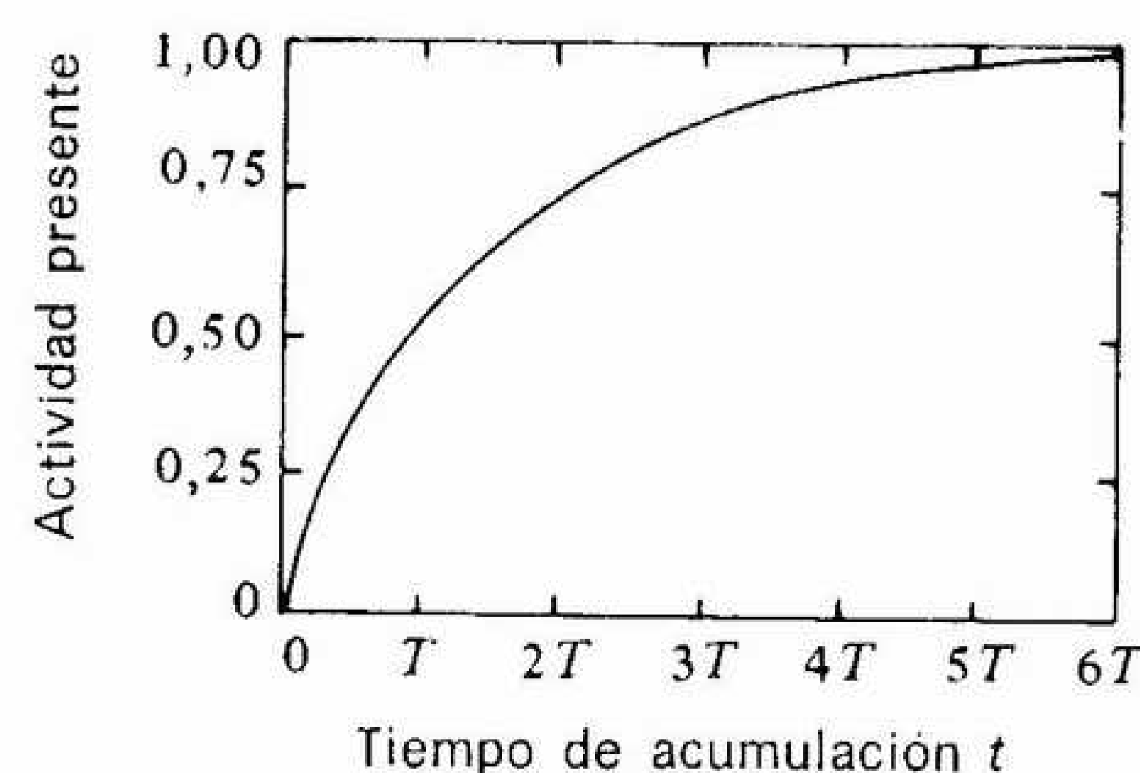
[1] Disponemos de un cuaderno de laboratorio que empieza el 12 de enero de 1934 (véase facsímiles en las páginas 100-101), pero es probable que las mediciones anotadas en sus primeras páginas no sean realmente las primeras del descubrimiento. Es verosímil que el descubrimiento se efectuara el jueves y que el cuaderno de medidas correspondiente haya desaparecido. En la colección de cuadernos de laboratorio de los archivos del Instituto del Radio, parece haber un «vacío» entre el 15 de diciembre de 1933 y el 12 de enero de 1934.



Montaje del experimento que condujo al descubrimiento de la radiactividad artificial. El recinto puede llenarse de gas CO_2 a presión variable; puede hacerse variar así la energía de la radiación α (emitida por la fuente de polonio, a la izquierda) que llega a la hoja de aluminio. Ésta cierra la cámara, a la derecha, delante de un contador de Geiger-Müller (visto en sección).

aluminio a irradiar, muy cerca del contador Geiger-Müller (véase figura). Este contador representaba una técnica nueva del Instituto del Radio, donde acababa de ser introducida por el joven físico alemán W. Gentner, que llegaría a ser el amigo fiel de F. Joliot en los días alegres y en los tristes. El contador, de latón, que comprendía una rendija de aluminio, estaba destinado a detectar con gran eficacia los electrones positivos. A continuación del detector había un pequeño amplificador, utilizando un viejo aparato de telegrafía sin hilos, y un numerador mecánico: cada electrón detectado producía un impulso eléctrico, contado por el numerador. La intensidad de la radiación emitida podía entonces medirse por el número de impulsos por minuto o fracción de minuto. Modificando la presión de CO_2 en la cámara, se frenaban más o menos las partículas alfa, con lo cual variaba su energía de impacto sobre el aluminio.

Frédéric Joliot empieza por disminuir la presión de CO_2; la energía de la radiación alfa aumenta: los electrones positivos aparecen al mismo nivel de energía que los neutrones; la cámara se vacía totalmente del gas: las partículas alfa del polonio llegan al aluminio con su energía máxima: mide entonces el número de positrones emitidos con el contador Geiger-Müller. Después rein-

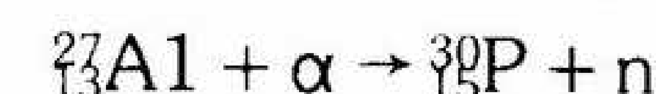


Ley de formación de un radioelemento de período corto en una sustancia madre de período largo. Esta misma ley rige la formación de un radioelemento artificial por irradiación de un blanco a intensidad constante.

troduce CO_2 en la cámara para llevar la energía de las partículas alfa por debajo del umbral de emisión de los neutrones; ya no se emiten más neutrones, pero, top, top, top, el numerador continúa contando: ¡Prosigue la emisión de electrones positivos!

Vuelve a empezar; el recinto se vacía de nuevo; después se llena por completo de CO_2 hasta la presión atmosférica: las partículas alfa quedan totalmente detenidas en el gas y no consiguen llegar a la hoja de aluminio; y no obstante, ¡los electrones positivos siguen allí! Y lo que es más, su número decrece exponencialmente en función del tiempo. F. Joliot relaciona de inmediato este hecho con la radiactividad de los radioelementos naturales, que él conoce bien. Todo el experimento no había durado más de una hora.

La cámara intermedia llena de CO_2 no era en absoluto necesaria; el físico repite el experimento, simplificándolo: coloca una hoja de aluminio directamente contra la fuente de polonio durante algunos minutos, después retira la fuente de polonio y coloca el aluminio sobre el contador; éste registra la disminución del número de electrones positivos, con un período de 3 minutos y 15 segundos. F. Joliot disminuye un poco la energía de los rayos alfa intercalando unas pantallas delgadas; la intensidad del fenómeno disminuye, pero el período de disminución sigue siendo el mismo. Además, la intensidad inicial de la radiación observada aumenta con la duración de la exposición a las partículas alfa del polonio, según la ley característica de formación de un radioelemento (véase figura adjunta). La conclusión estaba ahí, irremediable: el neutrón y el positrón no se emitían a la vez; había dos etapas sucesivas. Por una reacción nuclear (α,n) en el aluminio, se formaba primero un núcleo de una especie nueva, desconocida hasta entonces, el fósforo 30, isótopo del núcleo estable de fósforo 31. Y este fósforo 30, producido artificialmente, era radiactivo por emisión espontánea de positrones; era una nueva forma de radiactividad, la radiactividad β^+, simétrica de la radiactividad β^-, que ya era conocida por los radioelementos naturales. Por lo tanto, podía escribirse:



$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + \alpha \rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + \mathrm{n}$$

seguido de:



$$^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + e^+ + \nu$$

donde ν representa el neutrino de Pauli; el núcleo final era un isótopo del silicio. Ahí estaba pues la verdadera naturaleza de los «electrones positivos de transmutación».

No obstante, antes de quedarse con esta explicación F. Joliot se ve asaltado por una duda: ¿No habrá de nuevo alguna causa de error insospechada? El contador Geiger-Müller se comportaba a veces de una manera caprichosa; el suyo funcionaba sólo con 9 voltios de potencial: ¿Y si hubiera un residuo de descarga, que simulara una radiactividad? Joliot llama al experto en contadores, Gentner, que trabajaba en otra parte del edificio. Vuelven a empezar el experimento juntos: Gentner verifica el contador y concluye que no hay problema por este lado. Era ya de noche; Joliot dice a Gentner: «Si el contador funciona bien, creo que comprendo la física del fenómeno. Es lástima, pero estoy invitado a cenar junto con Irène; me molesta mucho, pero debo ir. ¿Podrías quedarte un poco y probar una vez más?» Gentner se queda, verifica de nuevo, y deja una nota escrita indicando que todo está en orden.

Después de la cena, Frédéric e Irène discuten el nuevo experimento y sus resultados. Comprenden toda su importancia y deciden repetir mañana una vez más todas las mediciones, e irradiar toda una serie de elementos para buscar nuevas radiactividades correspondientes a los electrones positivos de transmutación. Deben trabajar rápido para poder presentar estos resultados en la sesión de la Academia del lunes siguiente. Antes de la publicación, no hablarán con nadie de todo ello, pues desean realizar tranquilamente su experimento hasta el fin. Después, Irène iniciará los preparativos para los ensayos de separación química.

Trabajan, con tenacidad, el viernes 12 y el sábado 13, y estudian sucesivamente Al, B, Mg, el fluoruro de calcio, Na, Be, N, O, C, H, Ag, Li. Observan un nitrógeno 13 de 14 minutos de período formado en el boro, y un radioelemento de 2 minutos 30 segundos de período formado en el magnesio, que creen al principio que es un silicio 27[1], pero no encuentran ningún efecto en los otros elementos irradiados.

Empleando diversos juegos de pantallas, miden el recorrido y la energía máxima de la radiación β emitida. F. Joliot proseguirá las medidas con la cámara de Wilson[2], y con el electroimán que permitía utilizar el método de la trocoide, para demostrar que la radiación del boro y del aluminio irradiados está constituida con toda seguridad por electrones positivos, y que su espectro es análogo a los espectros β^-. Esas medidas le parecen tan concluyentes que desea que un tercero las repita. Ya son casi las siete de la tarde, y oye unos pasos en el pasillo del sótano; es L. Goldstein, que está preparando fuentes de radón para Mme. Curie; ya tenía puesto el abrigo para salir. Joliot le hace entrar en su habitación, le explica el principio en que se basan las mediciones y le pide que las repita en su ausencia, mientras va a fumar un cigarrillo en el pasillo. Goldstein confirma las observaciones de Joliot.

Frédéric e Irène Joliot-Curie anunciaron su logro en una nota en las actas de la Academia de Ciencias, presentada por Jean Perrin en la sesión del lunes 15 de enero de 1934 (anexo, página 189). El matrimonio reanudó el trabajo de inmediato para aportar una prueba química de la creación de los nuevos radioisótopos.

[1] Los dos físicos encontraron, en los meses siguientes, que el radioisótopo formado en el magnesio era ^{28}Al, emisor β^- producido por la reacción (α,p) en el isótopo ^{25}Mg. Los períodos que dieron al principio eran algo excesivos, puesto que, como Joliot explicó más tarde: «Empezamos con unos numeradores cuyo tiempo muerto era demasiado largo y que entraban en saturación en el caso de tasas de conteo altas.»

[2] La observación de los positrones en la cámara de Wilson no permitía sin embargo evidenciar el decrecimiento característico de la radiactividad artificial en el caso de un radioelemento de período corto, a consecuencia del tiempo de recuperación bastante largo de la cámara (cerca de 4 minutos), lo que no permitía efectuar expansiones sucesivas de manera seguida. El contador de Geiger-Müller era, en cambio, un instrumento particularmente adaptado a las mediciones de decrecimiento.

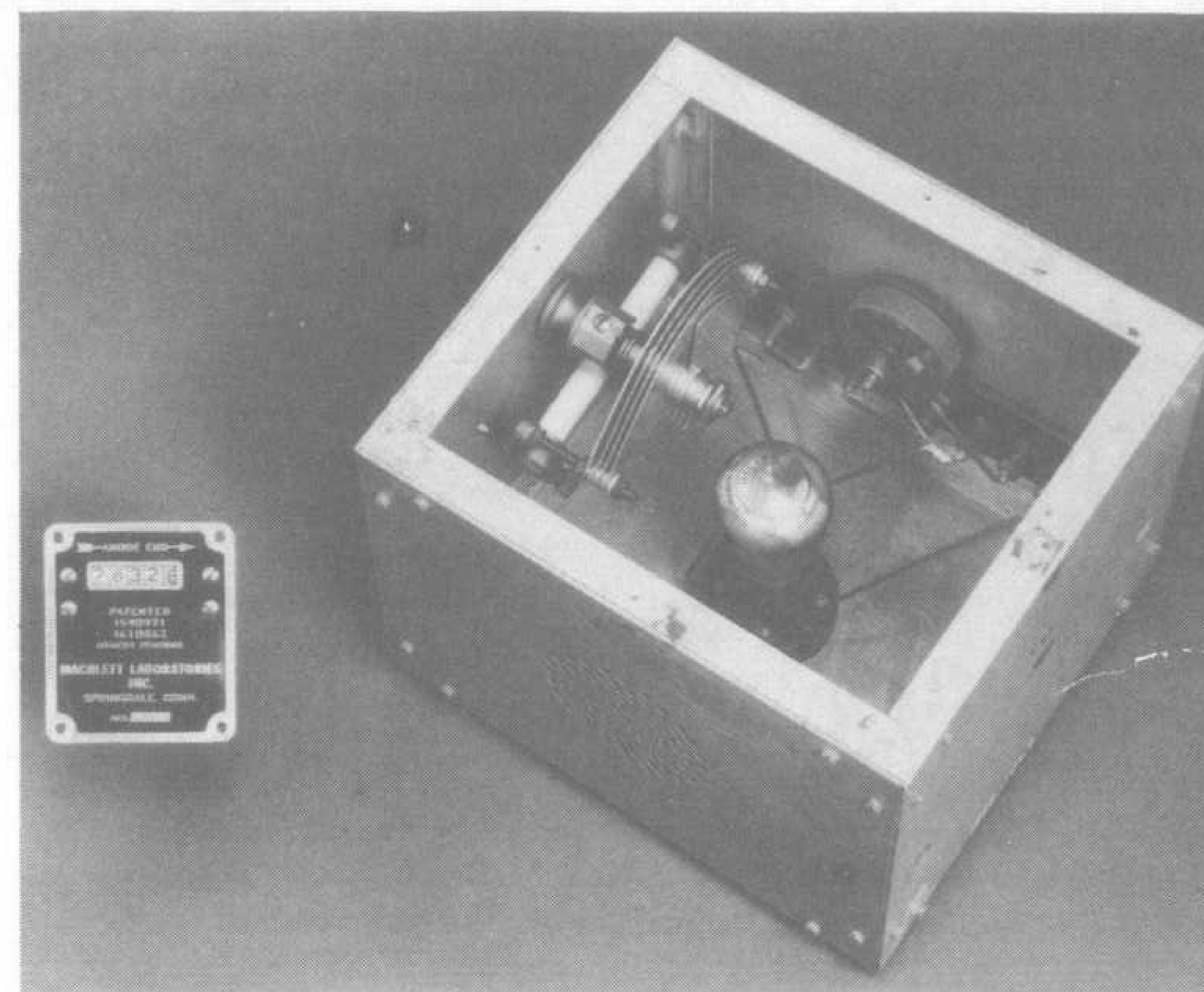


Foto del montaje electrónico utilizado con el contador Geiger-Müller del descubrimiento. *A la derecha,* el amplificador de válvulas, *a la izquierda,* abajo, el numerador.

Acerca de ello, expusieron que: «La realidad de las transmutaciones no se ha podido verificar jamás por vía química, como en el caso de la desintegración natural de los elementos radiactivos. Esto se debe a que el pequeño número de átomos producidos durante una transmutación artificial, no puede ser detectado por ningún procedimiento de análisis y, por consiguiente, no pueden reconocerse sus propiedades químicas.

»Aquí, por el contrario, al irradiar boro, magnesio y aluminio, obtenemos núcleos diferentes, en número muy pequeño, pero sus propiedades radiactivas permiten que sean detectados.»

Revelaron así que, en el tratamiento químico del boro irradiado, la radiactividad observada se separa con el nitrógeno en forma de amoníaco: el elemento emisor de positrones era efectivamente distinto del boro, y se comporta químicamente como el nitrógeno. Para demostrar que los átomos radiactivos formados en el alumi-

5'. Le 12 janvier 1934 1.

Source Po (II/1)

Mt propre 8/minute

4847
4920 3' 27/3 = 9/minute Mt propre
27

Exp. Al 5/100 1mm au dessus de la Source

4895
Mt propre 4847 5' 9,6/minute Mt p.
48

4980					
5031	51	204			
5082	51	204			
5127	45	180		5601 55	110
5172	45	180	1/2	5656	
5215	43	172	1/2	5698 42	84
5256	41	164	1/2		
5292	36	144	1/2	5731 33	66
5330	38	152	1/2	5769 37	74
5366	36	144	1/2	5804 35	70
5410	44	176			
5440	30	120	1/2	5829 25	50
5480	40	160	1		
5509	29	116	1	5880	61
5539	30	120	1	5916	36
5570	31	124	1	5951	35
5601	31	124	1	5985	34
			1	6002	17

Páginas del cuaderno de laboratorio del viernes 12 de enero de 1934.

12 Cas de Al —

$T = 3'20'' = 200''$ $\lambda = \frac{0.693}{200} = 3.47\times10^{-3}\ sec^{-1}$

Angle solide compté ? $\sim \frac{1}{60}$

$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$ $dt = 1\ sec$ $dN \sim \frac{200}{60}$ positons/sec

$N_1 = \frac{200}{60} \times 60 \times \frac{1}{3.47\times10^{-3}} \sim 10^5$ p/4π

présents sur Al au temps 0.

D'autre part pendant 10' d'exposition il s'est formé

$N = N_\infty(1 - e^{-\lambda t})$ $t \approx 3T$ $e^{-\lambda t} \ll 1$

$N_2 = N_\infty = \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{\rho\times10^9}{3.47\times10^{-3}} = 3\rho\times10^{11}$ p.

Po ues émettent $\frac{77000}{1300} \times \frac{1.85\times10^{10}}{1000} = 10^9\ \alpha/sec$

$N_1 = N_2^{Al}$ $3\rho\times10^{11} = 10^5$ $\rho = \frac{1}{3}10^{-6}$ alors autre fait partir α.

Cas de Bore.

$T = 14' = 840''$ $\lambda = \frac{0.693}{840} = 8.24\times10^{-4}\ sec^{-1}$

$dN \sim \frac{100}{60}$ p/sec $dN\ 100$/m 4π

$N = \frac{10^2}{8.24}10^4 = \sim 10^5$

$N_B = \frac{\rho'10^9}{8.24\times10^{-4}}(1 - e^{-8.24\times10^{-4}\times480}) = \frac{0.33\rho'10^9}{8.24\times10^{-4}}$

$4\rho'\times10^{11} = 10^5$ $\rho' \sim \frac{1}{4}10^{-6}$

du même ordre que pour l'Aluminium

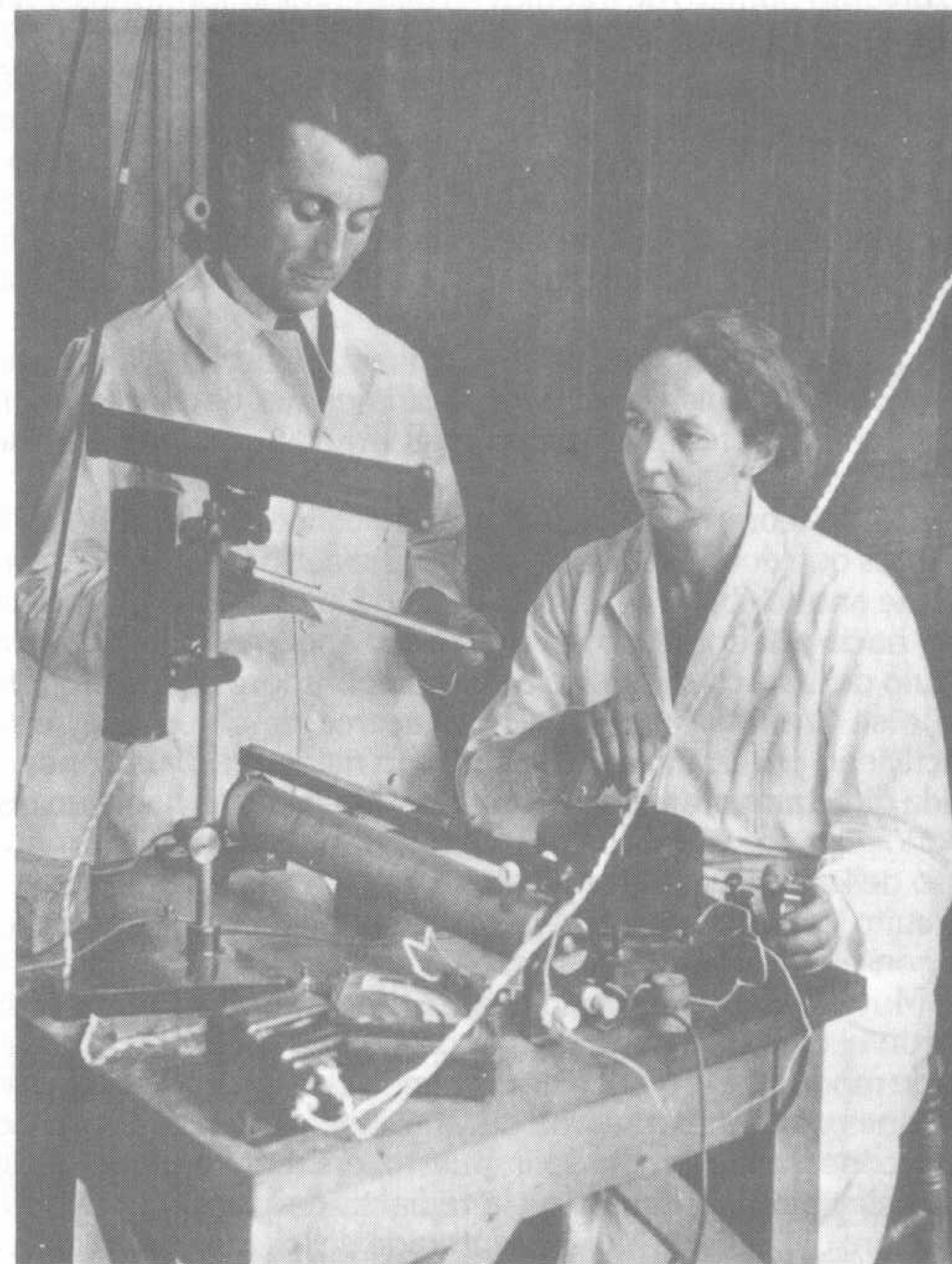
Ces calculs sont approximatifs.

nio eran de fósforo, operaron de la siguiente manera: una delgada hoja de aluminio, previamente irradiada, era atacada y disuelta en una disolución de ácido clorhídrico en el fondo de un pequeño tubo que contenía también una pequeña cantidad de fósforo rojo. La sal de aluminio inmediatamente secada no era ya radiactiva. La reacción química producía hidrógeno naciente mezclado con hidrógeno fosforado, que arrastraban al elemento radiactivo a otro pequeño tubo de paredes delgadas dispuesto en un recipiente con agua (véase la figura en la Conferencia Nobel de F. Joliot, en el Anexo, página 200). Este segundo tubo se tapaba y se transportaba rápidamente al aparato de medida. La operación debía realizarse en muy pocos minutos, debido al decrecimiento rápido de la radiactividad, que es la única propiedad que permite «seguir» los átomos.

A propósito de esto, explicaron algún tiempo después: «Un día nos encontramos con uno de los químicos que trabajaba en uno de los laboratorios de la calle Pierre Curie, y uno de nosotros le pidió que nos indicara un procedimiento para separar el fósforo del aluminio en tres minutos; el químico levantó los brazos al cielo, dado que jamás había considerado la química bajo esta perspectiva. Sin embargo lo conseguimos.» Estos experimentos fueron presentados a la Academia el día 29 de enero de 1934 (anexo, página 193). Frédéric e Irène Joliot propusieron denominar los nuevos radioelementos: «radionitrógeno» y «radiofósforo».

Mucho más tarde, en una emisión radiofónica, F. Joliot refirió: «Marie Curie fue testimonio de nuestras investigaciones, y jamás olvidaré la expresión de intensa alegría que manifestó cuando Irène y yo le mostramos, en un pequeño tubo de vidrio, el primer radioelemento artificial. Todavía la veo, tomando entre sus dedos, quemados ya por el radio, ese pequeño tubo radioelemento, cuya actividad era aún muy débil. Para comprobar lo que le anunciábamos, lo aproximó a un contador de Geiger-Müller y pudo oír las numerosas señales del numerador de radiación. Ésta fue sin duda la última gran satisfacción de su vida. Unos meses más tarde, Marie Curie fallecía a causa de una leucemia.»

La investigación del origen de los electrones positivos de transmutación había llevado a un gran descubrimiento. La identificación química de los nuevos radioelementos aportaba la prueba de que la explicación dada era correcta. Las implicaciones eran considerables: al lado de los núcleos estables, existían isótopos radiactivos que se transformaban con mayor o menor velocidad en isótopos estables; sus períodos eran lo suficientemente cortos para que no



Frédéric e Irène Joliot-Curie, inmediatamente después del descubrimiento, en 1934.

se les encontrara en la naturaleza; los radioelementos naturales sólo eran el caso particular de isótopos radiactivos de vida muy larga y de sus descendientes, que subsistían a lo largo de las eras geológicas, desde la época de su formación.

El descubrimiento de la radiactividad artificial suscitó de inme-

diato un gran número de trabajos en diferentes laboratorios. Frédéric e Irène Joliot habían escrito, en conclusión de su nota del 15 de enero: «Sin duda, pueden existir radiactividades duraderas, análogas a las que hemos observado, en el caso de bombardeo mediante otras partículas. Es indudable que podría crearse un mismo átomo radiactivo a partir de distintas reacciones nucleares. Por ejemplo, el núcleo $^{13}_{7}N$, que es radiactivo según nuestra hipótesis, podría obtenerse por la acción de un deuterón sobre el carbono, tras emisión de un neutrón.»

Algunas semanas más tarde, Cockroft, Gilbert y Walton, en el laboratorio Cavendish, aportaron la primera confirmación: con su acelerador de protones obtuvieron, al irradiar carbono, el mismo radionitrógeno ^{13}N.

El 24 de febrero, en Berkeley, en la colina por encima de los eucaliptus que domina la bahía de San Francisco, Lawrence leyó la nota que anunciaba el descubrimiento de la radiactividad artificial. Corrió hacia el laboratorio del ciclotrón y entró en él, blandiendo el fascículo de las Actas. Explicó a sus colaboradores que la sugerencia que se hacía al final de la nota acerca de obtener la misma radiactividad por irradiación de carbono mediante deuterones, iba dirigida directamente a él. En el interior del ciclotrón, había un disco giratorio formado por diversos blancos, uno de ellos de carbono. El equipo de Lawrence disponía también de un contador Geiger y de su circuito contador; pero este contador había sido montado en serie con el interruptor del oscilador de alta frecuencia del ciclotrón[1]. Muy rápidamente Henderson, Livingston y Lawrence desconectaron el contador para independizarlo del oscilador, giraron el disco de modo que el blanco de carbono se encontrara en el haz de deuterones y lo bombardearon durante cinco minutos. El oscilador fue desconectado, el contador puesto en marcha, y los físicos de Berkeley pudieron observar la radiactividad artificial menos de media hora después de haberse enterado de los resultados de F. e I. Joliot-Curie. De hecho, se dieron cuenta de que muchas piezas del ciclotrón y diversas herramientas de su alrededor, como los destornilladores, ya se habían vuelto radiactivos sin que lo hubieran advertido. En Berkeley se descubrieron después muchos otros radioisótopos artificiales.

[1] Puesto que estaba destinado al estudio de las reacciones nucleares que sólo tenían lugar cuando el ciclotrón estaba en marcha. En esa época, en Berkeley, se disponía aún de pocos contadores.

Extracto de una carta de W. Gentner a F. Joliot, del 19 de noviembre de 1935, felicitándole por la obtención del premio Nobel.

Heidelberg le 19. 11. 35.
Hohe Gasse

Cher Monsieur Joliot, c'est avec une grande joie que j'ai lu dans le journal la note sur l'attribution du prix Nobel à Madame Joliot et vous. Je vous prie ainsi que Madame Joliot de recevoir mes vives félicitations pour cette glorieuse approbation de votre travail scientifique. Je regrette beaucoup de ne pas pouvoir exprimer mes félicitations moi-même et prendre l'occasion de causer avec vous au moins pendant quelques instants. Comme j'ai été le premier témoin de cette grande découverte, j'aurais voulu être aussi un des premiers qui vous félicite.

En me rappelant de cette fameuse après midi j'admire toujours encore la grande vitesse avec laquelle vous avez reconnu toutesuite le fait et toute l'importance de cette découverte. Mais moi j'ai été le premier de faire aussitôt une autre découverte car je vous ai prédit toutesuite que ce travail vaut le prix Nobel et je suis bien content que ma prévision s'est vérifiée maintenant.

Je vous prie de transmettre à Madame Joliot mes hommages sincères et croyez vous même à ma vive amitié

W. Gentner.

Extracto de una carta de W. Gentner a F. Joliot, del 19 de noviembre de 1935, felicitándole por la obtención del premio Nobel.

Inmediatamente después de su descubrimiento, Frédéric e Irène recibieron una carta de Rutherford: «Me ha llenado de felicidad leer el resumen de vuestros experimentos de producción de un cuerpo radiactivo por irradiación con rayos alfa. Os felicito a ambos por este excelente trabajo que, estoy seguro, se revelará de una gran importancia. Estoy, personalmente, muy interesado en vuestros resultados pues, durante mucho tiempo, he creído que debía ser posible observar un efecto de este tipo, si uno se situaba en unas condiciones convenientes. En el pasado, he ensayado cierto número de experimentos empleando un electroscopio sensible para detectar tales efectos, pero sin éxito. También hemos investigado, el pasado año, el efecto de los protones sobre los elementos pesados, pero con resultados negativos.» En la posdata Rutherford añadía: «Vamos a tratar de ver si aparecen efectos similares a los vuestros al bombardear con protones o con deuterones.»

Recibieron también una carta de W. Pauli, de Zurich. Éste subrayó que la radiactividad β^+ debía presentar asimismo un espectro continuo, y que debía estar acompañada por la emisión de un neutrino de spin 1/2.

F. Rasetti, de Roma, les expresó también todo su interés e indicó que el equipo de Roma iba a tratar de reproducir sus experimentos.

En pocos meses, se descubrió toda una serie de radioelementos artificiales nuevos. Se hizo evidente entonces que tenía que ser posible fabricar artificialmente isótopos radiactivos de todos los elementos conocidos, y quizás incluso de los aún desconocidos.

En diciembre de 1935, en Estocolmo, el rey de Suecia entregó a Frédéric y a Irène Joliot-Curie el premio Nobel de Química, por su «síntesis de nuevos elementos radiactivos». Al mismo tiempo, se otorgó el premio Nobel de Física a J. Chadwick por «su descubrimiento del neutrón».

3. LOS PROTAGONISTAS

Frédéric e Irène Joliot-Curie

Jean-Frédéric Joliot nació el 19 de marzo de 1900, en París, en una familia alsaciana protestante; su padre era un comerciante acomodado. Tenía dos hermanas y un hermano, los tres mayores que él.

Frédéric era un niño bullicioso e impulsivo. Después de la escuela primaria, ingresó en el liceo Lakanal, en Sceaux, y más tarde en la escuela Lavoisier, en París. Fue un alumno normal en la enseñanza secundaria, brillante sobre todo en gimnasia, y sólo se interesó por la física y por la química durante el bachillerato.

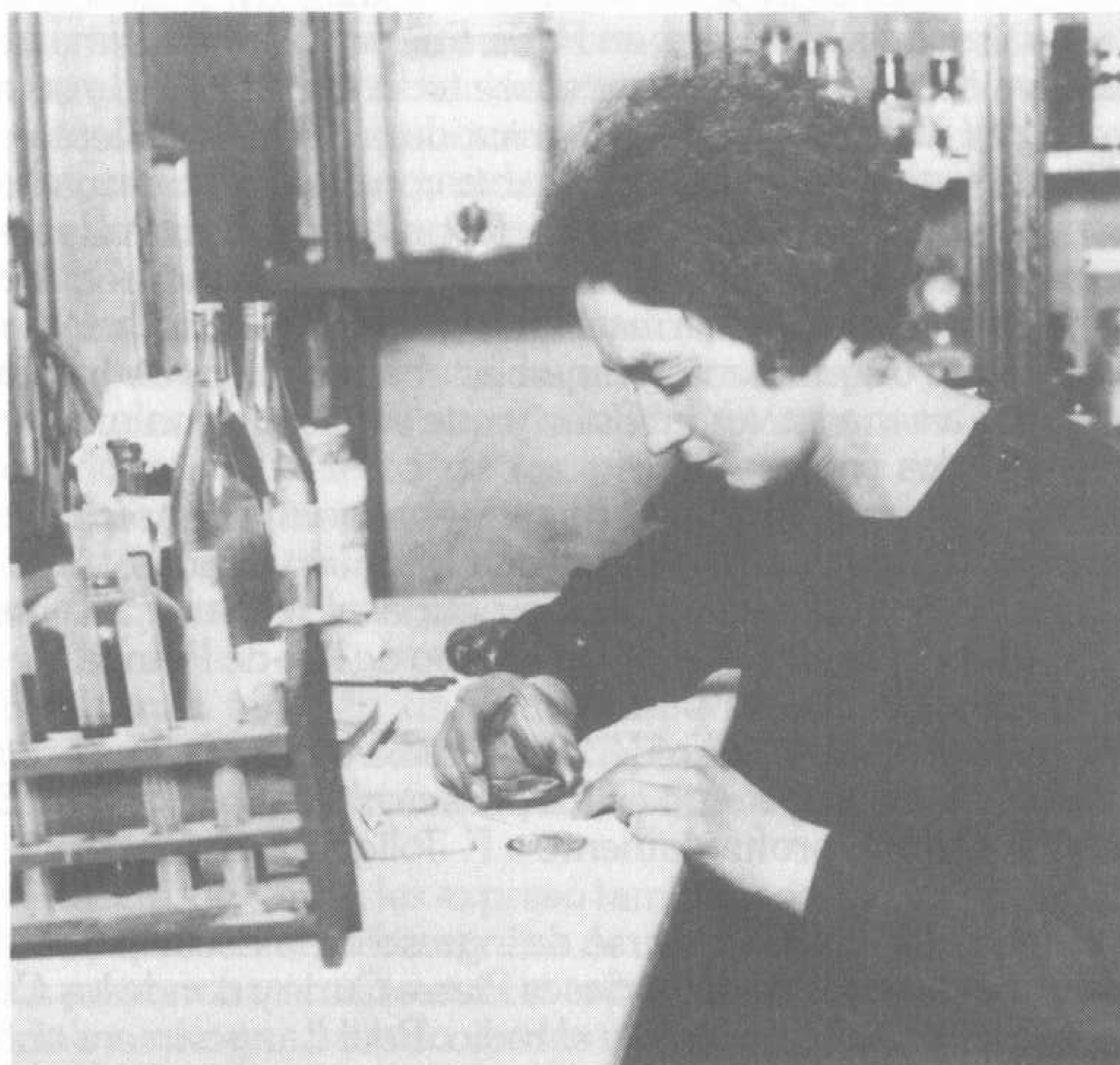
Al igual que otros jóvenes, se había construido, en el cuarto de baño del piso familiar, un pequeño laboratorio y había adornado las paredes con fotografías de los científicos que admiraba. Podía verse allí un grabado de Pierre y Marie Curie ante sus instrumentos de medida, en un momento en que estaba muy lejos de imaginar que llegaría a ser a su vez un físico y que se casaría con una de las hijas de los dos sabios.

Frédéric Joliot, como su hermano y sus hermanas, recibió una educación muy completa con actividades muy variadas; visitó exposiciones de pintura, fue con frecuencia al teatro y al cine; le gustaba pasear largas horas por el campo de l'Ile-de-France. Pescaba, e iba de caza con su padre.

Henri, el hermano de Frédéric, que tenía entonces 25 años, fue movilizado en 1914, y murió en los primeros días de la guerra. Este drama impresionó profundamente a F. Joliot. Su padre falleció en 1917.

Frédéric preparó el concurso de ingreso en la Escuela de Física y Química, donde había dado clases Pierre Curie y donde los Curie habían descubierto el polonio y el radio. Paul Langevin era entonces el director de estudios. Frédéric ingresó en 1919, pero una enfermedad le obligó a interrumpir sus estudios. Los reanudó el año siguiente, y tuvo por compañero de promoción a Pierre Biquard, que se convertiría en su mejor amigo. Eligió en un principio la opción de química, pero, en el último minuto, optó por la física, lo que hizo exclamar a Gustave Bémont, que, con los Curie, había aislado el radio: «He aquí a un físico de la segunda cosecha» (Pierre Biquard). Acabó sus estudios con el número uno de su promoción y pasó un período de prácticas en una acería de Luxemburgo. Marchó al servicio militar y, poco antes de terminarlo, fue presentado por Paul Langevin a Marie Curie, quién le tomó de inmediato como preparador particular en el Instituto del Radio, en diciembre de 1924.

Mientras trabajaba en el laboratorio, Joliot obtuvo una beca Rothschild, y superó las reválidas. Decidió preparar una tesis doctoral sobre el estudio electroquímico de los radioelementos, tesis que defendería en 1930. Dado que su beca se reveló insuficiente para



Irène Curie en el laboratorio, en 1921.

vivir, dio clases de medidas eléctricas en la Escuela de Electricidad Industrial Charliat.

El primer trabajo donde se encuentran asociados los nombres de Frédéric e Irène fue publicado en 1928, en una nota en las actas de la Academia de Ciencias sobre el número de iones producidos por los rayos α del polonio. Los dos jóvenes investigadores estaban casados desde el 4 de octubre de 1926.

Irène Curie, primogénita de Pierre y Marie Curie, nació el 12 de septiembre de 1897, en París. Después de dos años de estudios en la cooperativa de enseñanza que su madre y otros profesores de universidad, como Paul Langevin, Jean Perrin y M. Mouton, habían fundado para sus hijos, preparó el bachillerato en el colegio Sévig-



Frédéric Joliot, hacia 1932.

né y, durante la Primera Guerra Mundial, emprendió los estudios de licenciatura en ciencias físicas, simultaneándolos con los cuidados a los heridos, junto a su madre, como enfermera radióloga. Esta actividad, realizada sin tomar precauciones contra los rayos X, tuvo como consecuencia la degradación continua de su estado de salud, unos años después.

En 1919, ocupó las funciones de ayudante junto a su madre en el Instituto del Radio. Irène concibió un electroscopio de panes de oro para medir la radiactividad de los abonos. Más tarde se dedicó a la investigación fundamental y preparó una tesis sobre los rayos alfa del polonio, tesis que defendió en 1925. Inmediatamente después, comenzó a trabajar con Frédéric Joliot.

Irène, tímida, sin coquetería, imperturbablemente tranquila y de

una gran sencillez, inaccesible en apariencia, por su inteligencia y su sensibilidad supo gustar al joven físico, cuyas cualidades seductoras eran numerosas y variadas: inteligente, apasionado, brillante, buen conversador. Compartieron su afición por los deportes, la natación, el tenis, el esquí, y también su pasión por la investigación científica. Eran complementarios: ella difícilmente trababa amistad con la gente, él tenía una gran facilidad para relacionarse con los demás; ella se mostraba tranquila y serena, él, entusiasta e impulsivo.

Tuvieron dos hijos, Hélène, nacida en 1927, y Pierre, en 1932.

Efectuaron buena parte de sus trabajos comunes con el maravilloso instrumento que es la cámara de Wilson, y Frédéric, especialmente dotado para los trabajos manuales, concibió y puso a punto un nuevo modelo de presión variable. Después comenzó el período particularmente fructífero de su colaboración. Gracias a las fuentes intensas de polonio que habían preparado: estudio de la radiación penetrante, que llevaría al descubrimiento del neutrón... por Chadwick; más tarde, sus investigaciones sobre los electrones positivos.

El 15 de enero de 1934, las actas de la Academia de Ciencias publicaron el descubrimiento de la radiactividad artificial. El adjetivo «artificial» no les gustaba a los Joliot, que insistían siempre en decir que la radiactividad que ellos habían obtenido era idéntica a la radiactividad natural, y que lo único artificial era la producción de los isótopos radiactivos.

Algo más de un año después de la muerte de Marie Curie, en diciembre de 1935, la joven pareja fue laureada con el premio Nobel, el mismo año que J. Chadwick, por la síntesis de nuevos elementos radiactivos.

En 1936, Irène aceptó crear, en el gobierno del Frente Popular presidido por Léon Blum, la Subsecretaría de Estado para la Investigación Científica, cuyo cargo sólo quiso ocupar por algunos meses, antes de entregar la antorcha a Jean Perrin.

En cuanto a Frédéric, fue nombrado, en 1937, profesor en el College de France. Su nombramiento iba acompañado de la asignación de un laboratorio y créditos especiales para construir uno de los primeros ciclotrones de Europa. Para desarrollar en Francia la construcción de aceleradores, Frédéric creó el laboratorio de síntesis atómica de Ivry.

Irène fue nombrada profesora en la Facultad de Ciencias de París, en 1937. De vuelta a su laboratorio, cuyo director era entonces André Debierne, antiguo colaborador de Marie Curie,



El rey de Suecia recibe a F. e I. Joliot-Curie en ocasión de la entrega del premio Nobel, en Estocolmo, en diciembre de 1935.

que había descubierto el actinio, prosiguió sus investigaciones. Con Pavlé Savitch, se esforzó en resolver el enigma de los transuránicos.

Después del descubrimiento de la fisión nuclear por Otto Hahn y Fritz Strassmann, F. Joliot ideó, en enero de 1939, con una rápida intuición, un experimento para probar de manera física la ruptura de los núcleos de uranio.

Con sus colaboradores, Hans von Halban junior, Lew Kowarski, así como Francis Perrin (hijo de Jean Perrin), iba a demostrar la posibilidad de realizar una reacción en cadena divergente suscepti-



Frédéric Joliot montando una bobina para el campo magnético de la cámara de Wilson de presión variable.

ble de liberar energía utilizable. Junto con Halban y Kowarsky, depositó la reseña de estos trabajos, el 30 de octubre de 1939, bajo sobre cerrado en la Academia de Ciencias. La guerra había empezado, en efecto, el 3 de septiembre de 1939, y las condiciones de la investigación atómica se encontraban trastornadas.

A propuesta de Frédéric Joliot, que había sido movilizado como capitán de artillería, el ministro de Armamento, Raoul Dautry,



Irène Joliot-Curie efectúa una manipulación de química.

envió una misión a Noruega para adquirir todo el agua pesada disponible en el mundo (185 kilogramos), pocas semanas antes de la conquista de Francia por los alemanes. Henri Moureu transportó los preciosos bidones a Clermont-Ferrand y los depositó en la cámara acorazada del Banco de Francia, donde fueron registrados bajo el nombre de producto Z. Los Joliot se trasladaron a la capital de la Auvernia para montar allí un laboratorio, pero el ejército

alemán proseguía su avance hacia el centro de Francia; el producto Z tuvo que ser evacuado a Riom y depositado en el Tribunal de Justicia, en la celda de los criminales peligrosos. Estuvo poco tiempo allí. El enemigo se aproximaba. El 18 de junio, a solicitud de F. Joliot, Halban y Kowarski se embarcaron con el agua pesada, a bordo del *Broompark*, con destino a Inglaterra. Joliot decidió quedarse en Francia. Halban y Kowarski proseguirían sus investigaciones en Inglaterra y después en Canadá.

El laboratorio del Collège de France fue ocupado por los alemanes; por suerte, el físico alemán W. Gentner, que había trabajado ya con los Joliot en el Instituto del Radio, se ofreció —con la aprobación secreta de F. Joliot— para llevar el control del laboratorio, y consiguió protegerlo.

F. Joliot militó muy pronto en la Resistencia. En 1941, pasó a ser presidente del Front National. En 1934, se había inscrito en el Partido Socialista SFIO. Durante la Ocupación, se adhirió al Partido Comunista francés.

Irène, enferma de tuberculosis, pasó frecuentes temporadas en los sanatorios de los Alpes. En junio de 1944, logró cruzar la frontera con sus hijos, Hélène y Pierre, y se refugió en Suiza, mientras que Frédéric, buscado por la Gestapo, pasaba a la clandestinidad con el nombre de Jean-Pierre Caumont.

En 1943, F. Joliot había sido elegido miembro de la Academia de Ciencias y de la Academia de Medicina. Participó en diversos estudios de biofísica empleando indicadores radiactivos.

Cuando París fue liberado, F. Joliot aceptó reorganizar y dirigir el Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNRS).

A propuesta de F. Joliot, el general de Gaulle creó el comisariado para la Energía Atómica; el científico fue naturalmente su primer alto comisario, mientras que Raoul Dautry era nombrado administrador general. El primer comité de la energía atómica del CEA estaba formado por: el presidente del gobierno provisional, Frédéric Joliot, Raoul Dautry, el general Dassault, Irène Joliot-Curie, Pierre Auger y Francis Perrin. El plan del comité científico del CEA preveía tres etapas: en primer lugar la construcción de una pila atómica (después se llamarían reactores nucleares) de uranio natural y agua pesada; a continuación, la construcción de otras dos pilas de potencia media, así como un gran centro de estudios nucleares; por último, en un futuro más remoto, la construcción de una importante central de producción de energía.

El 15 de diciembre de 1948, a las 12 horas 12 minutos, la pila



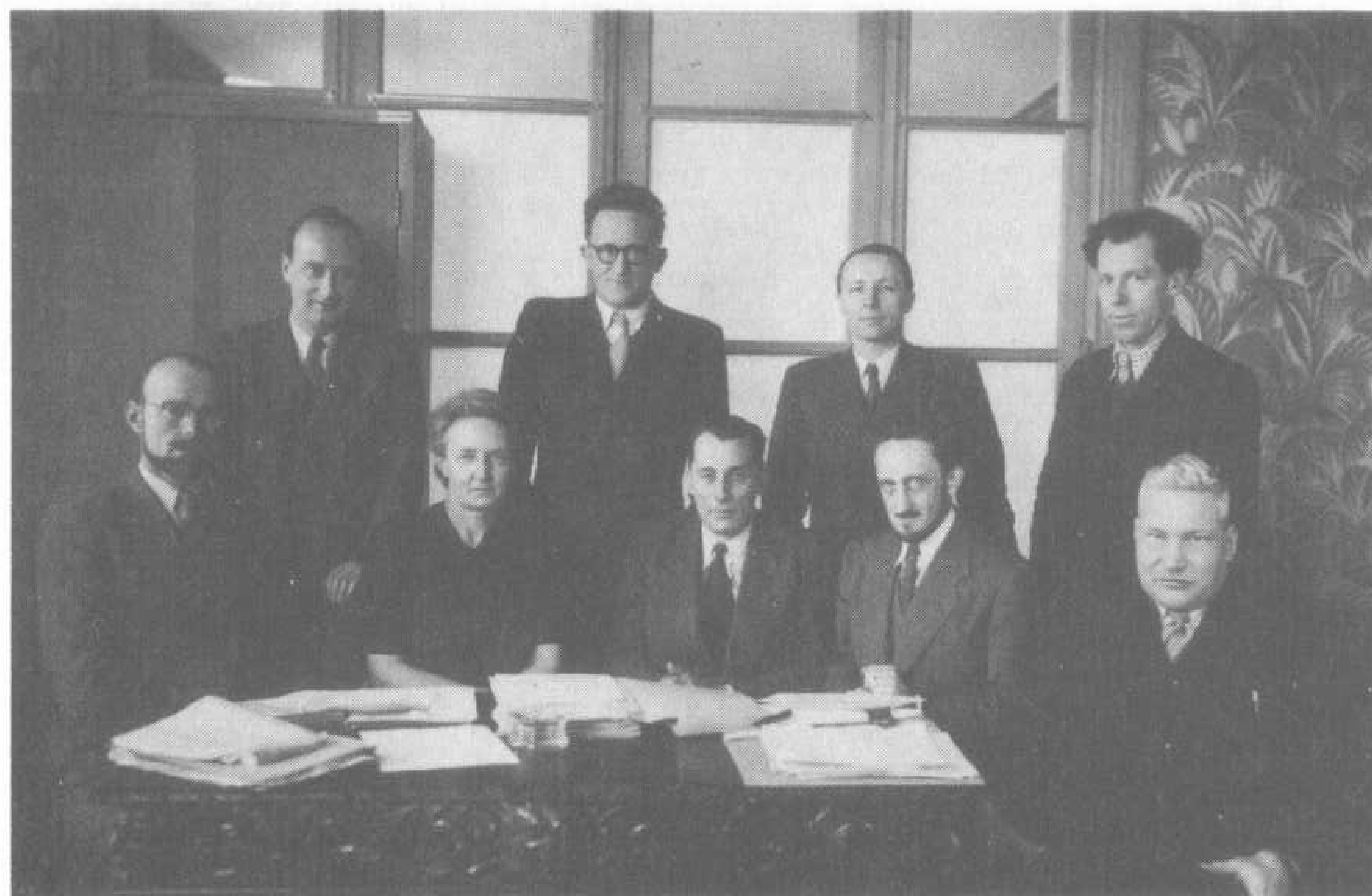
Paul Langevin *(a la izquierda)* entrega la espada de académico a Frédéric Joliot, en compañía de Irène Joliot-Curie y de G. Boreau.

ZOE (nombre propuesto por Kowarski: Z para cero [en francés zéro], porque la potencia de la pila era muy pequeña; O por óxido de uranio, y E por agua pesada [en francés, eau lourde]) entraba en divergencia en el fuerte de Châtillon. Era un gran éxito para Francia, después de tantos años sin investigación nuclear.

La segunda etapa concerniente a la construcción de un gran centro de estudios nucleares, fue realizada también sin problemas: se inició la instalación de una segunda pila nuclear, en Saclay, cerca de París, así como de dos aceleradores de partículas.

En 1949, F. Joliot pasó a ser, a su creación, presidente del Consejo Mundial de la Paz. Profundamente impresionado, en 1945, por el empleo de la bomba atómica sobre el Japón, lanzó, en marzo de 1950, «la llamada de Estocolmo» para la prohibición de las armas atómicas, que reunió millones de firmas.

El 19 de marzo de 1950, Joliot celebró sus 50 años. El 29 de abril fue destituido por razones políticas, en plena guerra fría: desacuerdo con el gobierno de Georges Bidault acerca del empleo de la energía atómica. Francis Perrin será su sucesor.



Reunión del Comité Científico del CEA. *De izquierda a derecha, sentados:* Pierre Auger, Irène Joliot-Curie, Frédéric Joliot-Curie, Francis Perrin, Lew Kowarski. *De pie:* Bertrand Goldschmidt, Pierre Biquard, Léon Denivelle, Jean Langevin.

Irène, que había sucedido a André Debierne en la jefatura del Laboratorio Curie del Instituto del Radio, en 1946, dejará también el CEA.

Los medios de trabajo de los laboratorios del Collège de France y del Instituto del Radio, se vieron afectados por esta nueva situación.

Pero, en 1955, I. Joliot consiguió la creación de un nuevo laboratorio moderno, en Orsay, que debía dotarse de un sincrociclotrón.

Irène falleció el 17 de marzo de 1956, en el Hospital Curie, de una leucemia subaguda, provocada por sus trabajos.

La muerte de Irène afectará mucho a Frédéric Joliot, que tampoco gozaba de buena salud desde hacía varios años. Había seguido la enfermedad de su mujer y la suya propia, objetivamente, de una manera científica. Había instalado un pequeño estudio en su casa de Sceaux, y se dedicaba a la pintura. Al morir Irène, se le

nombró jefe del Laboratorio Curie. Consagró los dos últimos años de su vida a poner en marcha el nuevo laboratorio de física nuclear, en Orsay, no lejos de Saclay, donde fue transferido el ciclotrón del Collège de France. Asistió a la puesta en marcha del sincrociclotrón de 156 MeV, pero no tuvo tiempo de ver la extracción de su haz. Murió el 14 de agosto de 1958.

A su muerte se decretó luto nacional, como dos años antes se había hecho para Irène. Su cuerpo descansa junto a los de su esposa y de Pierre y Marie Curie, en el cementerio de Sceaux.

Los que tuvieron ocasión de relacionarse con Frédéric e Irène Joliot-Curie, después de la guerra, no podían dejar de señalar las diferencias entre sus dos personalidades.

Irène era reservada, concisa, casi tímida, pero dotada de una fuerte dosis de ironía. No daba ninguna importancia al aspecto exterior, a la forma.

Irène Joliot está dando su clase. Duda de cuando en cuando, buscando las palabras para encontrar la mejor expresión. Traza un diagrama en la pizarra, después quiere hacer algunas modificaciones. Se moja de saliva el dedo índice y borra en algunos puntos el trazo de la tiza, para transformar una línea seguida en una línea de puntos.

A principios de verano, después de los exámenes de licenciatura en radiactividad y física nuclear, Irène recibe individualmente a los estudiantes que así lo solicitan. Una joven alumna sale de su despacho muy inquieta y explica: «Durante toda la conversación, Mme. Joliot me miraba los pies. Llevo los pies desnudos en mis sandalias y llevo las uñas pintadas con laca roja. Estoy segura de que esto no le ha gustado. Mme. Joliot ha salido de la habitación de espaldas, sin poner fin en realidad a la conversación.»

Una tarde de otoño, en la agencia de un banco del bulevard Saint-Michel. Una persona, vestida con un impermeable, un sombrero de fieltro descolorido y ladeado, con sandalias a pesar del tiempo lluvioso, discute ante la ventanilla. Nos acercamos. Detrás del mostrador, el director de la agencia, con gran deferencia, le responde: «Seguro, señora, por descontado, señora». La interlocutora se vuelve. Es Mme. Joliot.

Un sábado por la mañana, hacia mediodía, en su casa de Sceaux. Una discusión animada con Frédéric Joliot, en su despacho. Joliot habla y habla. Mme. Joliot entra en la habitación, sin decir palabra. Se dirige a la biblioteca, mueve un objeto, toma un



Irène Joliot-Curie y Albert Einstein, en Princeton, en 1948.

libro, lo vuelve a dejar. Vuelve a salir. Pasan cinco minutos. Regresa, escucha un instante y vuelve a salir. Algunos minutos más tarde, vuelve a entrar: «Fred, realmente es hora de comer». Este último responde: «Concédeme unos minutos que ya voy.» Muy a su pesar, un poco más tarde, deja a su interlocutor para ir a la mesa familiar.

Cuando se entraba al despacho de Frédéric Joliot, el visitante, al principio, se sentía intimidado, puesto que de inmediato se tenía la impresión de estar ante una personalidad. Su gentileza, sin embargo, le tranquilizaba enseguida y no le daba mucho tiempo para exponer el motivo de su visita. Joliot, respondía con prontitud y después se abandonaba a las confidencias, contaba sus preocupaciones y comentaba los acontecimientos recientes. Su punto de vista evolucionaba constantemente, y un hecho o un argumento nuevo que apareciera en la conversación era integrado enseguida en ella. Joliot sacaba con rapidez consecuencias o conclusiones que iban más lejos que las de su interlocutor. En la discusión de nuevos experimentos, de nuevos resultados, daba rienda suelta a



Frédéric Joliot, por Picasso.

su imaginación, y muchas veces uno quedaba impresionado por la audacia de sus hipótesis. La entrevista podía durar una o dos horas. En el pasillo del Collège de France, ante su despacho y en las habitaciones contiguas, había, a veces, diversos visitantes o investigadores del laboratorio que esperaban ser recibidos a su vez, pero el que estaba dentro olvidaba muy pronto a los que esperaban fuera, apasionado por lo que oía.

En su laboratorio, la autoridad de Joliot era indiscutible. Era impensable hacer una gestión, enviar un artículo o convenir una colaboración exterior sin su conformidad. Para las decisiones importantes, Irène y Frédéric se consultaban siempre: «Hablaré de ello con M. Joliot», «Hablaré de ello con Mme. Joliot». En sus laboratorios respectivos, se les llamaba «le patron» y «la patronne».

Cuando se iniciaba un experimento con F. Joliot, éste prodigaba consejos acerca del orden y la precisión (que reconocía no haber seguido siempre en el pasado); recomendaba emplear un cuaderno y jamás hojas sueltas, incluso para notas de experimentos anodinos, que quizás después se revelarían importantes; aconsejaba indicar perfectamente la fecha, la hora, y toda modificación que el experimentador hubiera debido hacer. Exigía que las mesas y los aparatos estuvieran ordenados y bien colocados. Le gustaba realizar él mismo los diseños de las piezas mecánicas que debían construirse. Se hacía explicar con detalle, a la vez que tomaba notas, la utilización de un aparato que fuera nuevo para él.

A mediados de julio, Frédéric e Irène partían hacia su casa de vacaciones en L'Arcouest, en Bretaña, que era una casa donde ya había vivido Marie Curie. Las vacaciones, en medio de otros universitarios, eran sagradas, pero cuando tuvieron responsabilidades, se les mantenía informados, por carta, del progreso de los trabajos o se les pedía su consejo. En invierno no dejaban de ir a esquiar en los Alpes, los últimos años en su chalet de Courchevel.

En la biblioteca del Collège de France, de cuando en cuando, F. Joliot organizaba lo que se denominaban seminarios de ideas, (que es lo que hoy se llamaría, en inglés, *brain-storming*). Cada uno explicaba las reflexiones y las ideas que le sugería determinada lectura de un artículo, una reciente conferencia o incluso los experimentos recién iniciados o en preparación. El «patrón» comentaba y aportaba siempre sus propias observaciones.

F. Joliot tenía una opinión muy firme acerca del papel respectivo del experimento y de la teoría que, en física nuclear, se han convertido en dos profesiones distintas: el experimento debe tratar



Frédéric Joliot muestra el lucio que acaba de pescar.

de preceder a la teoría; hay que procurar no seguirla siempre. El teórico, además de sus propias investigaciones, debe interesarse en los experimentos realizados en su laboratorio o en los laboratorios afines. La teoría debe ser empleada y considerada desde el punto de vista físico; Joliot creía que los físicos teóricos franceses tenían

una buena formación en matemáticas, pero poca formación en física.

Estaba preocupado, a principios de los años cincuenta, por la pobreza de Francia en aceleradores. «Esta situación es muy dañina y no podremos mantener nuestro rango. Sin embargo en otros países, incluso pequeños como Holanda o Suecia, se están realizando esfuerzos considerables. La producción científica francesa corre el peligro de declinar, y sin embargo la gente cualificada existe. La única manera de asegurar la independencia del país propio es aportar alguna cosa a los demás» (curso en el Collège de France de 1953-54).

F. Joliot atribuyó siempre gran importancia a los grandes instrumentos y a las grandes herramientas de investigación. Creía mucho en el trabajo en equipo, conservando cada uno su individualidad y aportando su propia originalidad. Insistía en la importancia de la tradición (de la «buena» tradición, se entiende) para un laboratorio o para toda un área de conocimiento en un país; este tipo de tradición es un bien precioso que debe preservarse. Repetía: «No miréis siempre a casa de los otros. No miréis siempre a la acera de enfrente.»

6. DESPUÉS DEL DESCUBRIMIENTO

1. PRIMERAS APLICACIONES EN MEDICINA Y EN BIOLOGÍA

Los científicos alemanes Walkoff y Giesel fueron los primeros en anunciar, en 1900, que los cuerpos radiactivos recientemente descubiertos podían tener efectos sobre los seres vivos. Pierre Curie, colocó de inmediato una muestra de radio sobre su brazo, durante varias horas, para verificar el efecto anunciado. Marie Curie escribió: «Se le produjo una lesión, parecida a una quemadura, que se desarrolló progresivamente y tardó unos meses en curar». En 1901, H. Becquerel, que asistía a una conferencia en Londres, llevó consigo, en el bolsillo de su chaleco, un tubo que contenía una sal de radio y, a su regreso, comprobó que tenía una quemadura. Fue a ver a los Curie y les dijo, refiriéndose a la sal: «Me gusta, pero le tengo manía.»

A sugerencia del norteamericano A. Graham Bell y de algunos médicos franceses, los doctores Danlos y Dominici, en particular, estas propiedades se emplearon muy pronto para tratar afecciones cutáneas, como ciertos tipos de cáncer. Era el inicio de la curieterapia.

Durante una estancia de G. de Hevesy, en Manchester, con Rutherford, éste le pidió que separara químicamente el radio D del radio G inactivo. De Hevesy no pudo lograrlo. En la misma época, en Viena, Stefan Meyer planteaba el mismo problema a F. A. Paneth, que tampoco consiguió resolverlo. El descubrimiento de la isotopía a cargo de F. Soddy y otros varios físicos, en 1913, les dio la explicación: el radio D y el radio G son ambos isótopos del plomo. El mismo año, De Hevesy pasaba una temporada en el

Instituto del Radio de Viena e ideó, con Paneth, el método de los indicadores radiactivos, que emplearon por vez primera en un experimento de química analítica. Dos isótopos de un mismo elemento, que tienen por tanto las mismas propiedades químicas y físicas, se comportan exactamente de la misma manera en una reacción química o en un proceso biológico. Una cantidad pequeñísima de un isótopo radiactivo de corto período, que emite una radiación que permite detectarlo y seguir su rastro, se añade a un isótopo estable, o de período muy largo, del mismo elemento; es posible, de este modo, seguir ese elemento químico en todos los procesos en los que esté implicado.

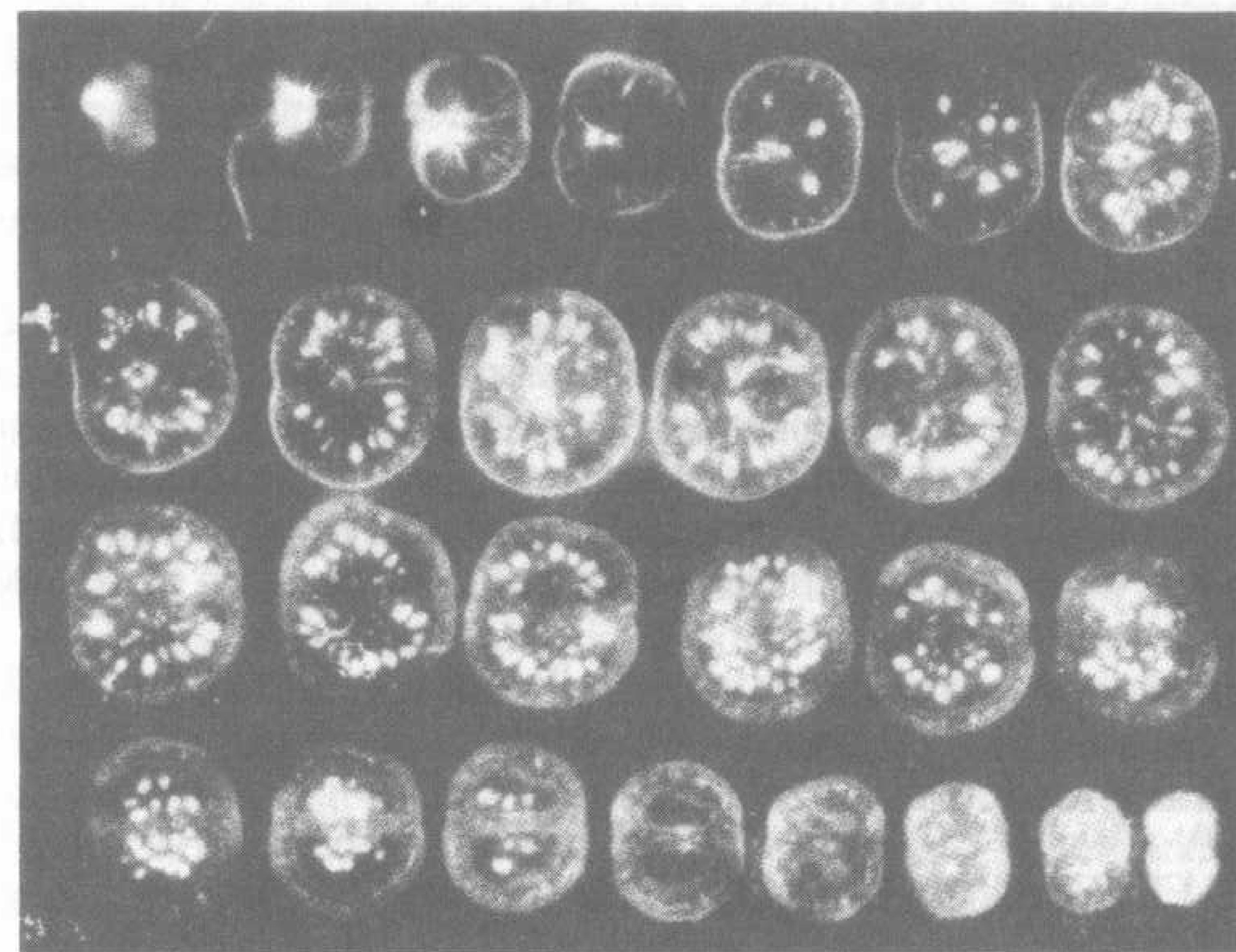
En 1923, de Hevesy utilizó el radio D para estudiar el metabolismo del plomo en las plantas. Su método de detección, mediante un electroscopio de panes de oro, era lo suficiente sensible para no tener que recurrir a cantidades de plomo demasiado elevadas y evitar todo efecto tóxico.

Una aplicación muy interesante de los indicadores radiactivos fue la autorradiografía, una técnica ideada por A. Lacassagne y Mme. J.-S. Lattès, en 1924. Se introduce un producto radiactivo, en cantidad ínfima, en un organismo vivo; aquél se acumula en tal o cual parte de la planta o del animal; seguidamente pueden prepararse una serie de cortes, que se colocan sobre placas fotográficas y se revelan al cabo de un tiempo de exposición conveniente, lo cual proporciona por «autorradiografía» (examinada, si es necesario, al microscopio) la localización exacta de la acumulación del elemento químico al que se ha añadido el indicador radiactivo.

Hasta 1934 estos distintos métodos estaban necesariamente limitados a los elementos pesados con radiactividad natural, entre el talio y el uranio, que no tienen mucha importancia biológica.

La situación cambió por completo con el descubrimiento de la radiactividad artificial. Se hacía posible entonces la producción artificial de radioisótopos de los elementos químicos más importantes en biología, y su utilización como indicadores radiactivos. Esto fue señalado, en octubre de 1934, por Frédéric e Irène Joliot-Curie, en el Congreso de Londres, así como por E. O. Lawrence, quien anunció, en la misma época, la producción en su ciclotrón de un sodio radiactivo de un período de 15 horas.

En el curso del mes de septiembre de 1935, G. de Hevesy, entonces en el Instituto de Física Teórica de Copenhague, y O. Chiewitz, en el Hospital Fuisen de la misma ciudad, emplearon, por vez primera, un radioisótopo artificial, el fósforo 32, de un



Autorradiografía que muestra una distribución de cinc radiactivo en unas secciones de tomate (P. Stout, según E. Pollard y W. L. Davidson Jr., *op. cit.*).

período de 17 días, como indicador radiactivo para el estudio, en la rata, del metabolismo del fósforo. Las ratas habían recibido algunos miligramos de fosfato de sodio, que contenía fósforo 32 como trazador. El estudio permitió concluir que un átomo de fósforo permanece alrededor de dos meses en el organismo de una rata normal, antes de ser eliminado.

Rápidamente aparecieron otras utilizaciones, en especial en Berkeley, bajo el impulso de Joseph Hamilton y de John Lawrence. Éste fue el primero en utilizar ^{32}P en el tratamiento de la leucemia.

Se cuenta que E. O. Lawrence, para ilustrar su clase, se tomaba al principio de su exposición el contenido de un vaso de agua en el cual se había disuelto una tableta de cloruro sódico (Na Cl), que contenía un pequeño porcentaje del indicador radiactivo ^{24}Na. A continuación ponía su mano encima de un contador Geiger-Müller y mostraba cómo circulaba la sal por su cuerpo y podía incluso antes de acabar la clase, con una segunda medida, dar una idea del decrecimiento del isótopo radiactivo. Los radioelementos de corto

período se consideran inofensivos para el organismo, si se emplean en cantidades muy pequeñas, que desaparecen con rapidez.

El yodo radiactivo se utilizó, a partir de 1937, para el estudio del metabolismo del yodo en la glándula tiroides y para el tratamiento de las enfermedades de esta glándula. Al principio se empleó yodo 128, de un período de 25 minutos, y después yodo 131 de 8 días de período.

La curieterapia se reemplazó por la cobaltoterapia, gracias a los rayos gamma muy penetrantes emitidos por el cobalto 60. Los neutrones y las partículas cargadas aceleradas sirvieron asimismo para la terapia de ciertos tipos de cáncer. La madre de Lawrence, aquejada de un cáncer no operable, habría sido la primera paciente sometida, con éxito, a un tratamiento por neutrones, en el ciclotrón de Berkeley.

Volveremos sobre estos desarrollos en el último capítulo.

2. LA AVENTURA DE LOS NEUTRONES Y EL ENIGMA DE LOS TRANSURÁNICOS

La noticia del descubrimiento de la radiactividad artificial llegó con rapidez al Instituto de Física de Roma, donde trabajaba Enrico Fermi. Más tarde, un miembro de su joven equipo, E. Segrè, escribirá: «Hemos leído el anuncio sensacional del descubrimiento de la radiactividad artificial por Irène Curie y Frédéric Joliot. Se trataba de "gran física" y era fácil de comprender. Fermi vio de inmediato la ventaja que supondría emplear neutrones como proyectiles, y reconoció que ésta era la ocasión tanto tiempo esperada para nuestra entrada en la física nuclear experimental.»

La producción de núcleos radiactivos mediante partículas cargadas estaba limitada entonces a los elementos ligeros (hasta el número atómico 15 aproximadamente). Las fuentes de neutrones disponibles eran, sin duda, menos intensas, pero, al no tener carga los neutrones, deberían ser mucho más eficaces, puesto que no tenían ante sí ninguna barrera de potencial al penetrar en los núcleos, ni que fueran núcleos pesados; además, se podían emplear blancos a irradiar más gruesos, dado que los neutrones eran más penetrantes. Para producirlos, Fermi obtuvo del profesor Trabacchi, del Laboratorio de Física de la Sanidad Pública, fuentes importantes de polvo de berilio y radón.

Con su espíritu metódico y su perseverancia característicos,

Fermi decidió estudiar todos los elementos posibles, por orden de número atómico creciente. Empezó por el hidrógeno y no renunció a su idea, si bien los ocho primeros elementos, hasta el oxígeno inclusive, no mostraron radiactividad inducida detectable. Por fin, el flúor ($Z = 9$) dio una radiactividad nueva, con un período de alrededor de 10 segundos. Aparecieron otras actividades muy fuertes en el aluminio, el silicio, el cromo, el hierro, la plata, y el yodo. Estos resultados aparecieron publicados en la revista *Nature*, en mayo de 1934. Rutherford felicitó a Fermi por sus resultados con la siguiente nota: «No está mal para un debutante.»

Con la perspectiva de obtener un gran número de nuevos radioelementos, Fermi propuso a E. Amaldi, E. Segrè, F. Rasetti y al químico O. d'Agostino, que se encontraba entonces realizando prácticas en el Instituto del Radio de París, y más tarde a B. Pontecorvo que se unieran a él para explotar su idea que demostraba ser tan fructífera. El equipo ensayó todos los elementos que pudo obtener. Segrè cuenta que trató incluso de obtener masurio, nombre dado al elemento hipotético $Z = 43$, pero que el químico al que se dirigió le dijo que no lo había visto nunca.

El 16 de junio de 1934, Fermi pudo anunciar el descubrimiento de radiactividades nuevas en 47 elementos de los 68 estudiados hasta entonces.

Los nuevos isótopos radiactivos se producían sobre todo mediante una reacción de captura de neutrones (n, γ) así como por las reacciones ($n,2n$), (n,p) y (n,α). En ciertas condiciones experimentales, que al principio no logró delimitar bien, el equipo de Roma se dio cuenta de que obtenía actividades especialmente fuertes. Esto parecía deberse a objetos o a materiales que rodeaban la fuente de neutrones. El 24 de octubre de 1934, al mediodía, descubrió que cuando los neutrones eran filtrados con parafina o con una gran cantidad de agua, su eficacia para hacer radiactivos a ciertos elementos pasaba a ser mucho mayor. A las tres de la tarde «después de comer y de la siesta», como cuenta Segrè, Fermi indicó a sus colaboradores que creía haber encontrado la razón: los neutrones eran frenados por sus choques contra los núcleos de hidrógeno, muy numerosos en la parafina y en el agua. Por esto se hacían más eficaces. La sección eficaz de las reacciones por neutrones aumentaba en razón inversa de la velocidad v de los neutrones (ley hiperbólica). En efecto, cuanto más lento era el neutrón más tiempo permanecía en el volumen del núcleo, y tenía, por tanto, más posibilidades de ser capturado.

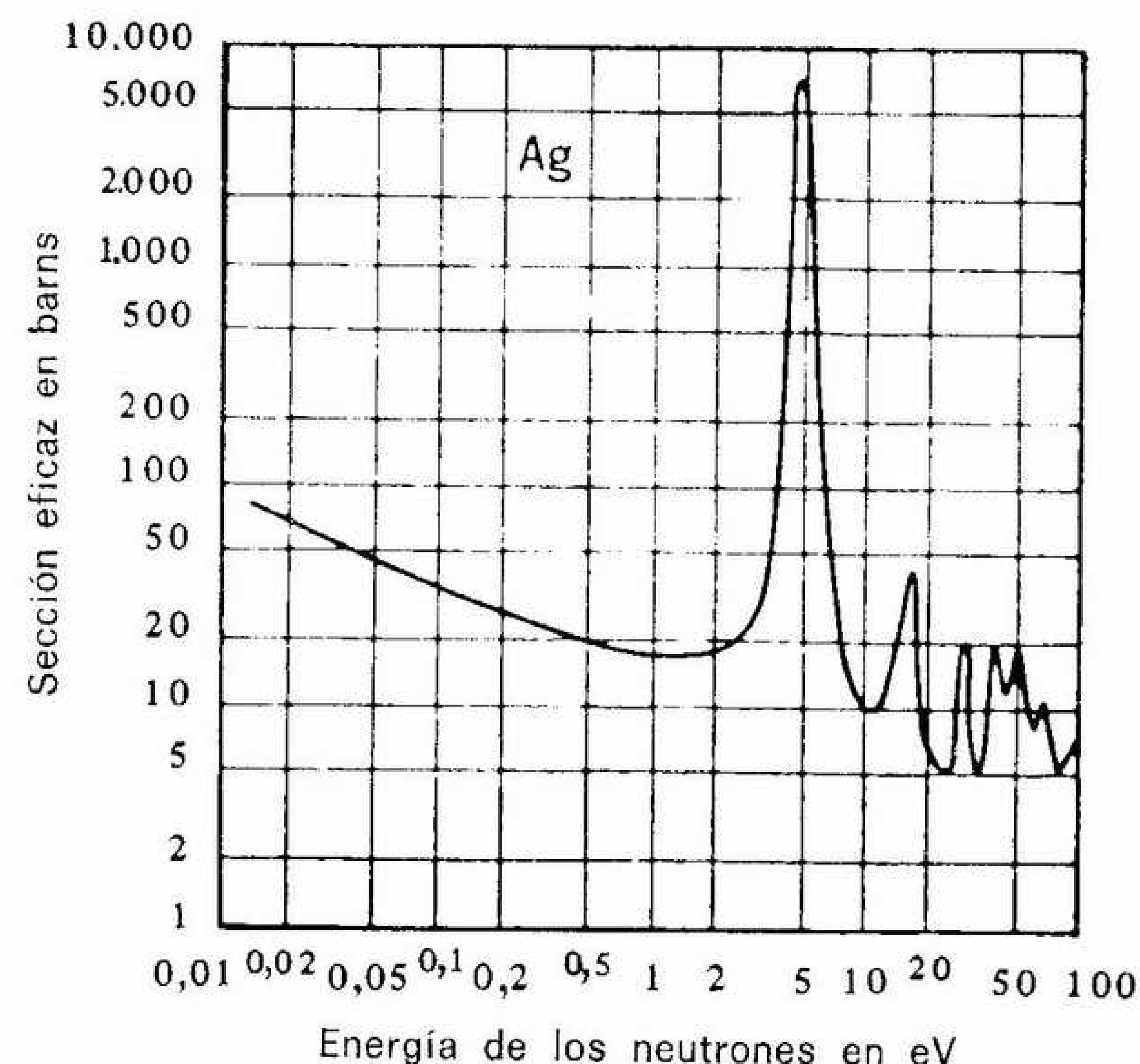
1. SECCIÓN EFICAZ

La intensidad de una reacción nuclear, su probabilidad, se mide en física nuclear mediante su «sección eficaz», que es la probabilidad por segundo de que un núcleo blanco experimente una reacción de un tipo determinado, dividida por el número de partículas incidentes por cm^2 durante el mismo tiempo. Es posible representar la sección eficaz de la manera siguiente: si un proyectil, un punto en primera aproximación, llega a un conjunto de núcleos, cada núcleo puede imaginarse como un disco de cara a los proyectiles, que tiene una superficie igual a su sección eficaz. O, también, si es el núcleo el que puede considerarse puntual, puede asociarse ese disco con el proyectil.

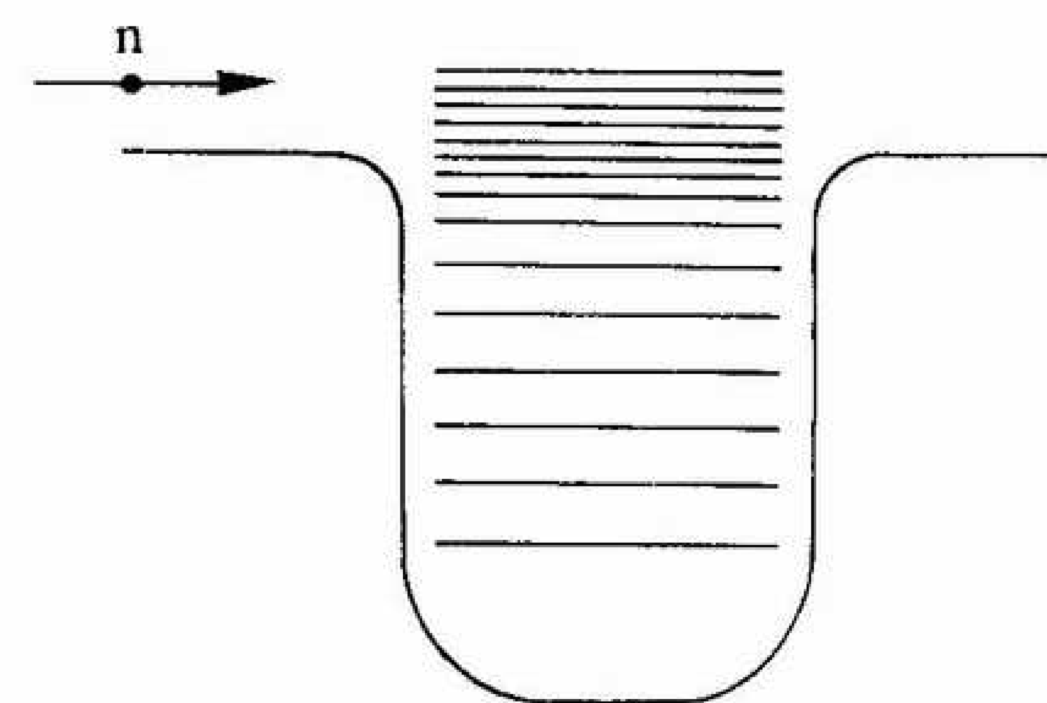
Un núcleo medio tiene una sección del orden de 10^{-12} cm. 10^{-12} cm $= 10^{-24}$ cm^2 Una reacción o una difusión que tenga una gran probabilidad de producirse corresponde a una sección eficaz de este orden. En física nuclear, se emplea con frecuencia, como unidad de sección eficaz, el barn, igual a 10^{-24} cm^2 La palabra barn designa en inglés una granja. Se dice que, durante la última guerra, los físicos de la Universidad Purdue, discutiendo acerca de una sección eficaz especialmente grande, decían entre ellos: «Es grande como una granja» (expresión popular norteamericana). La palabra se adoptó para designar la unidad de sección eficaz (submúltiplo: el milibarn: 10^{-27} cm^2).

Moon y Tillman, en Gran Bretaña, descubrieron, a principios de 1936, que existían en algunos núcleos, a ciertas energías, unas regiones angostas de absorción selectiva especialmente fuerte para los neutrones lentos. Eran «resonancias», que se superponían a la variación hiperbólica de la sección eficaz de captura de los neutrones. En la figura adjunta se da un ejemplo típico del fenómeno. Este hecho experimental, que fue confirmado para toda una serie de núcleos, constituyó la base de la teoría de las resonancias, desarrollada por Breit y Wigner, y de la teoría del núcleo compuesto de N. Bohr: cuando un núcleo captura a un neutrón lento, el núcleo compuesto resultante está a una energía de excitación igual a la energía de enlace del neutrón incidente más su energía cinética (véase figura). Los niveles de energía del núcleo se encuentran cada vez más próximos, a medida que la energía se eleva. Pueden incluso «recubrirse» (habida cuenta de su anchura); su espaciamiento no es uniforme. Puede ocurrir pues que la energía aportada por un neutrón lento corresponda exactamente a un nivel aislado del núcleo final, y de ahí la resonancia.

Niels Bohr supuso que la reacción se desarrollaba en dos etapas sucesivas: el neutrón penetra en un núcleo pesado y forma con él un sistema compuesto. La energía aportada por el neutrón se reparte entre todos los constituyentes del núcleo. El núcleo compuesto así excitado, habiendo perdido la memoria de la manera como ha sido formado, regresa entonces a un estado más estable mediante alguno de los distintos procesos en competición: o bien emisión de radiación γ —se trata entonces de la reacción de



Resonancias de neutrones lentos en la plata.



Pozo de potencial para un neutrón lento y niveles de energía del núcleo.

captura (n,γ)— o emisión de una partícula, como por ejemplo en una reacción (n,α) (n,p)...

A partir de junio de 1934, Fermi, Rasetti y d'Agostino, en su búsqueda sistemática de nuevos radioelementos formados por acción de los neutrones, se interesaron por los elementos más pesados, el torio y el uranio. La captura de un neutrón por un elemento de número atómico Z debe llevar a un radioisótopo que se desintegre normalmente por radiactividad β^- dando el elemento Z + 1, para volver a encontrar la proporción natural de neutrones y de protones. ¿Qué ocurrirá entonces si se hace «tragar» un neutrón a un núcleo de uranio? ¿No se obtendrá así, por captura seguida de una emisión β^-, un núcleo de un elemento justo más allá del uranio, es decir, de un «transuránico», que no existe en la naturaleza? Esto es lo que pensaron Fermi y sus colaboradores al observar cinco períodos diferentes de radioelementos formados en el uranio. Realizaron diferentes separaciones químicas para ver si estas actividades correspondían a algún elemento químico situado entre el plomo y el uranio. No era ninguno de ellos, y dedujeron que las actividades observadas debían pertenecer a unos elementos Z = 93, 94 ó 95.

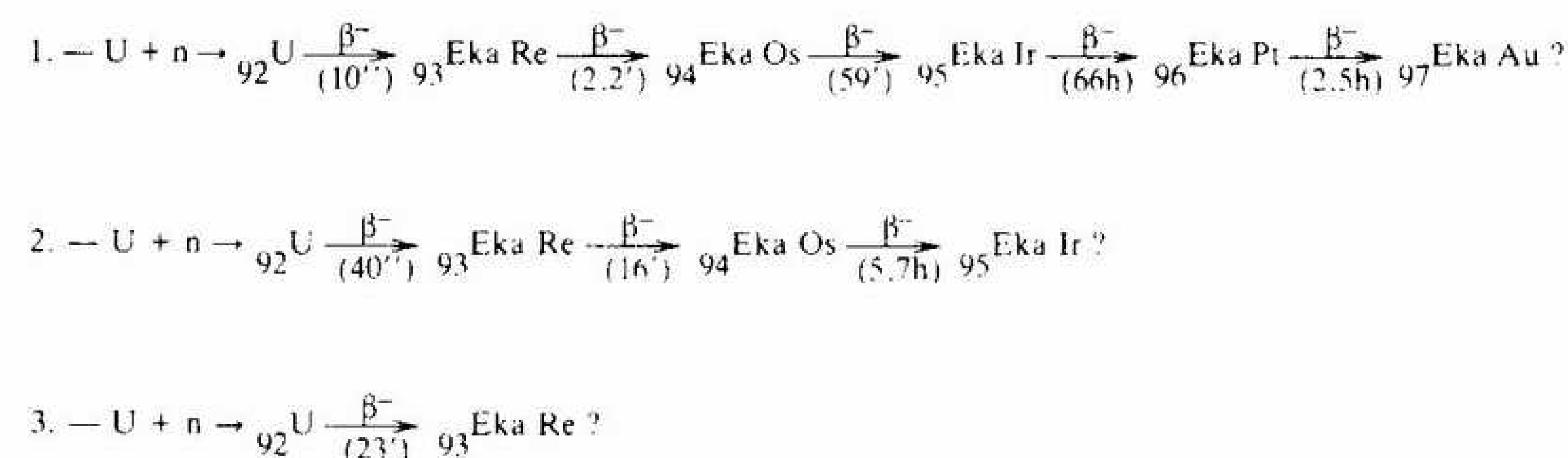
Una química alemana, Ida Noddack, criticó estas conclusiones en la *Revue de Chimie Appliquée*, indicando que el equipo de Fermi no había aportado la prueba de que esas radiactividades no pertenecieran a elementos químicos mucho más bajos en la tabla periódica de los elementos. Puesto que, añadía, «podría imaginarse que, en el bombardeo de núcleos pesados con neutrones, esos núcleos se desintegran en diversos fragmentos grandes». Esto era exactamente lo que se producía: los núcleos de uranio se fisionaban en dos núcleos más ligeros. Pero nadie tomó esta observación en consideración, puesto que las radiactividades observadas hasta entonces pertenecían siempre a elementos químicos próximos al elemento que había servido de blanco. I. Noddack no aportaba ninguna prueba experimental en apoyo de su hipótesis. Fueron precisos más de cuatro años para que se reconociera la verdad.

Los resultados de Fermi sobre el uranio y el torio desencadenaron toda una serie de trabajos en diversos laboratorios, en particular en Francia, Alemania y EE.UU. Un químico norteamericano, de origen alemán, emitió la hipótesis de que una de las radiactividades nuevas se debía al protactinio. Otto Hahn y Lise Meitner, que consideraban que el protactinio era algo así como su hijo, entraron en liza. En el Instituto del Radio, Irène Joliot-Curie, inicialmente con

H. von Halban y P. Preiswerk, y después con P. Savitch, pensó que quizá podrían existir, entre los radioelementos desconocidos, algunos miembros de la cuarta familia radiactiva (A = 4N+1) que no existen en la naturaleza, y se lanzaron también a la contienda. A continuación, Strassmann se unió a Hahn y Meitner.

Las opiniones eran contradictorias, y los equipos concurrentes rivalizaban en la elección y la precisión de sus separaciones químicas. Sin embargo, los nuevos resultados aportados, en lugar de simplificar y esclarecer el cuadro, no hicieron más que complicarlo. ¡Había demasiados transuránicos!

Para encajar todas las nuevas actividades descubiertas, Hahn, Meiner y Strassmann se vieron obligados a admitir la existencia de varias cadenas radiactivas que comprendían diversas series de núcleos isómeros. Creyeron que se trataba de homólogos químicos superiores (la misma columna, pero una línea más adelante en el cuadro de Mendeleiev), del renio, del osmio, del iridio y del platino, a los que denominaron eka-renio, eka-osmio, eka-iridio, y eka-platino.



Creyeron que la captura de un neutrón por el uranio 238 podría formar tres núcleos isómeros del uranio 239. Todo ello era muy complicado y difícil de admitir. Para tratar de simplificar las cosas, Irène Joliot y Pavle Savitch eligieron seguir una de esas actividades por su radiación, capaz de atravesar una pantalla de 0,73 g/cm² de cobre. El cuerpo así seleccionado tenía un período de 3,5 horas. Al principio, creyeron que se trataba del torio pero, después de una carta crítica recibida de Hahn y Meitner, reanudaron las separaciones químicas con un enorme cuidado y mostraron que el cuerpo de 3,5 horas no era ni un torio ni un actinio: «En conjunto, sus propiedades son las del lantano, del que parece hasta

ahora que sólo se le puede separar por fraccionamiento.» Sin embargo, no lograban situar ese isótopo entre los transuránicos: era un misterio adicional. Estaban, sin saberlo, muy cerca de la verdad.

Los trabajos, en Alemania y en Italia, fueron perturbados gravemente por la situación política. Después de la anexión de Austria por Alemania, Lise Meitner, de nacionalidad austríaca, no se sentía segura en Berlín; pasó clandestinamente la frontera y se refugió en Estocolmo. Por otro lado, la nueva alianza entre Mussolini y Hitler y la legislación discriminatoria introducida entonces en Italia, condujo a Enrico Fermi, y después a E. Segrè, a emigrar a EE.UU., a finales de 1938, tras haber recibido el premio Nobel en Estocolmo.

Otto Hahn y F. Strassmann estaban muy sorprendidos por los resultados obtenidos por el equipo del Instituto del Radio. Decidieron verificarlos y, con este motivo, descubrieron a partir del uranio irradiado por los neutrones, tres o cuatro nuevos períodos radiactivos, que atribuyeron a isótopos del radio, pues tales sustancias se parecían químicamente a su homólogo inferior, el bario. Creyeron que de nuevo se trataba de una serie de isómeros, lo que era cada vez más sorprendente y difícil de comprender. Sometieron sus productos a un análisis químico especialmente riguroso. Sus resultados fueron enviados a la revista *Naturwissenschaften* el 22 de diciembre de 1938 y publicados en el número del 6 de enero de 1939. Pero dejémosles la palabra:

«Debemos hablar ahora de algunos experimentos más recientes, que publicamos con vacilaciones, a causa de sus extraños resultados. Para aportar la prueba, sin posible duda, de la naturaleza química de los radioelementos de partida de las diferentes series, separadas en compañía del bario y designadas como "isótopos del radio", hemos realizado sobre las sales activas de bario toda una serie de cristalizaciones y precipitaciones fraccionadas según el método conocido, utilizado para el enriquecimiento (o empobrecimiento) del radio en las sales de bario. [...] Los ensayos correspondientes que hemos efectuado sobre nuestras preparaciones de bario activo previamente desembarazado de sus descendientes *han dado sin excepción resultados negativos: la actividad quedaba repartida de manera uniforme en todas las fracciones de bario* [...].»

«Llegamos a la siguiente conclusión: nuestros "isótopos del radio" tienen las propiedades del bario: en tanto que químicos, deberíamos decir que, en cuanto a los cuerpos nuevos, no se trata de radio, sino de bario; puesto que no podía tratarse de otros

2. ISÓMEROS-ISOMERÍA NUCLEAR

En 1921, Otto Hahn descubrió un nuevo radioelemento, de 6,7 horas de período, al que denominó uranio Z, que correspondía a una débil ramificación (vía de desintegración) del uranio 234 (uranio X), pero la casilla en la que debía colocarse, atendiendo a sus propiedades físicas y a su número másico A, estaba ya ocupada por otro cuerpo (el uranio X_2, ^{234}Pa) de 1,2 minutos de período. Era preciso rendirse a la evidencia: se trataba del mismo isótopo 234 del mismo elemento químico $Z = 91$, pero éste podía encontrarse en dos estados diferentes, cada uno con sus propiedades radiactivas características.

Inmediatamente después del descubrimiento de la radiactividad artificial, Fermi y después Bothe y Gentner demostraron que existían dos estados del bromo 80, uno de período 18 minutos, y otro de período 4,4 horas. Se trataba del estado fundamental —el primero— y de un estado excitado metastable del mismo núcleo de bromo 80, el segundo. El estado excitado se denomina isómero del estado fundamental. Estos estados corresponden a movimientos internos muy diferentes de los nucleones dentro del núcleo. Por este hecho, el isómero tiene una probabilidad muy baja de desintegrarse dando el estado fundamental, y de ahí su período relativamente largo. En ciertos casos, como el del uranio X_2, el isómero decrece preferentemente por radiactividad β dando el núcleo vecino.

elementos distintos al radio o al bario. [...] Si nuestros "isótopos del radio" no son radio, entonces los "isótopos del actinio" tampoco son del actinio, sino que serían del lantano [...].»

«En lo que se refiere a los "transuránicos", tales elementos tienen un parentesco químico con sus homólogos inferiores, el renio, el osmio, el iridio y el platino, pero no son idénticos a ellos. En cuanto a saber si no serían quizá químicamente idénticos a homólogos aún más bajos, como el masurio [denominado hoy tecnecio], el rutenio, el rodio y el paladio, no lo hemos verificado aún. Pero con anterioridad no se podía pensar una cosa así. Ahora bien, la suma de las masas atómicas del bario y del masurio, esto es 138+101, ¡es igual a 239!»

«En tanto que químicos, de acuerdo con los experimentos descritos brevemente, deberíamos modificar las denominaciones en el esquema indicado más arriba y reemplazar los símbolos Ra, Ac, Th por los símbolos Ba, La y Ce. Como "químicos nucleares", próximos en cierto modo a la física, no nos podemos decidir aún a efectuar este salto, que está en contradicción con toda la experien-

cia anterior de la física nuclear. Quizá una serie de coincidencias accidentales raras nos ha inducido otra vez a error. [...]»

No se trataba de ningún error. Bajo la acción de los neutrones, los núcleos de uranio se escindían en dos núcleos complementarios más ligeros.

3. FISIÓN Y REACCIÓN EN CADENA

A partir de ahí, todo se precipitó. Antes incluso de la publicación. O. Hahn comunicó sus resultados en una carta a L. Meitner, en Suecia. Era la Navidad de 1938, y L. Meitner residía en un pequeño hotel cercano a Göteborg, donde recibió la visita de su sobrino O. Frisch, como escribió después en sus memorias. Éste la encontró, a la hora del desayuno, meditando sobre la carta que acababa de recibir. Meitner le mostró la carta. Fritz era escéptico, pero Lise Meitner tenía una absoluta confianza en los resultados químicos de Otto Hahn, que había sabido resolver en el pasado los rompecabezas más complicados. Paseando por la nieve, reflexionan juntos sobre lo que podía ocurrir. El núcleo de uranio se comportaba como una gota líquida; cuando recibía un suplemento de energía, la gota se deformaba, la repulsión coulombiana entre los protones de igual carga predominaba sobre las fuerzas nucleares atractivas. Se producía la fisión; el núcleo se dividía y los dos fragmentos resultantes salían cada uno por su lado, con liberación de una considerable energía, de alrededor de 180 MeV, de acuerdo con la diferencia entre la energía de enlace total de los nucleones que constituían el uranio inicial, y la de los dos núcleos más ligeros (véase curva, capítulo 4, página 75). L. Meitner y O. Frisch enviaron estas conclusiones, el 16 de enero de 1939, a la revista *Nature;* serían publicadas el 11 de febrero.

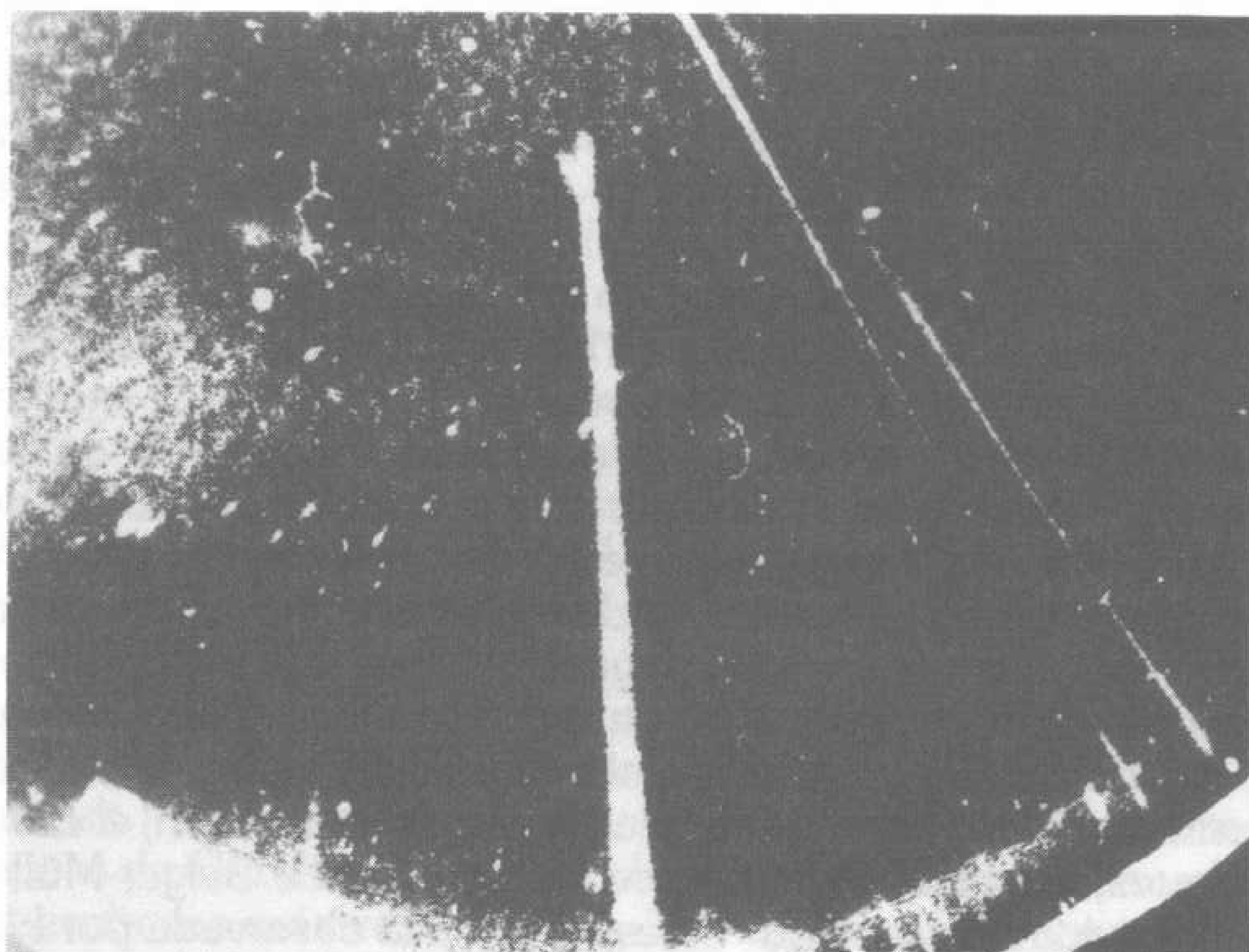
Entre tanto, todo había cambiado. Después de Navidad, Frisch regresó de Göteborg a Copenhague. Sometió los resultados de Hahn y Strassmann y sus propias ideas a Niels Bohr en el momento en que éste se embarcaba hacia EE.UU., en el paquebote *Drottningholm.* Niels Bohr se golpeó la frente, a las primeras palabras de Fritz, diciendo: «¡Qué idiotas hemos sido! Debíamos haberlo visto mucho antes.» Después Frisch, en Copenhague, tras haber discutido con G. Placzek, realizó un experimento que aportaba una prueba física de la fisión y revelaba, en una cámara de ionización, los tres grandes impulsos eléctricos debidos a los fragmentos de fisión: cualquier otra partícula daba impulsos más pequeños.

En el Collège de France, en París, H. von Halban se enteró también de los resultados de Hahn y Strassmann. Halban trataba de encontrar también un experimento que pudiera aportar una prueba física del fenómeno. F. Joliot pasaba por allí, como más tarde contó, y le preguntó qué es lo que estaba haciendo. Halban le refirió entonces la publicación del equipo alemán. Durante el día, Joliot ideó un experimento para verificar físicamente la existencia de la fisión: llegó a la conclusión de que los fragmentos de fisión tenían suficiente energía para salir de una masa de uranio. Dispuso una fuente de neutrones en el interior de un cilindro recubierto en su exterior por una capa de óxido de uranio. Alrededor de este cilindro de latón, colocó un segundo cilindro de baquelita; los fragmentos de fisión que salían de la capa de uranio eran proyectados, debido a su mayor energía, al interior del cilindro de baquelita distante 3 mm. Al cabo de algunas horas de exposición, el cilindro de baquelita se colocó en torno de un contador de Geiger-Müller, y la radiactividad así medida correspondía a la observada por Hahn y Strassmann. Estos resultados fueron presentados a la Academia de Ciencias, el 30 de enero de 1939. Las pruebas aportadas por Frisch y por Joliot eran simultáneas e independientes.

Durante este tiempo, en el Instituto del Radio, Irène Joliot-Curie había reanudado sus experimentos con P. Savitch, y revelado (en una nota en las Actas del 30 de enero) que el isótopo de 3,5 horas, observado en el uranio irradiado por los neutrones, era el mismo que el radioisótopo de igual período que había observado, tres años antes, con von Halban y Preiswerk, cuando irradiaron torio con neutrones. El mecanismo de fisión explicaba perfectamente este resultado.

F. Joliot se dio cuenta de que las trayectorias de los fragmentos de fisión debían poderse observar en su cámara de Wilson, a condición de trabajar a una presión menor de 200 mm de mercurio. Dispuso una fuente de neutrones filtrada por 2 cm de plomo contra la pared de la cámara. Colocó en el interior una cinta de papel cubierta con óxido de uranio. Calculó que debería observar un fragmento de fisión por cada 3.000 impactos. En el cliché número 902, observó una trayectoria de gran densidad de ionización que constituía una prueba visible de la fisión del uranio.

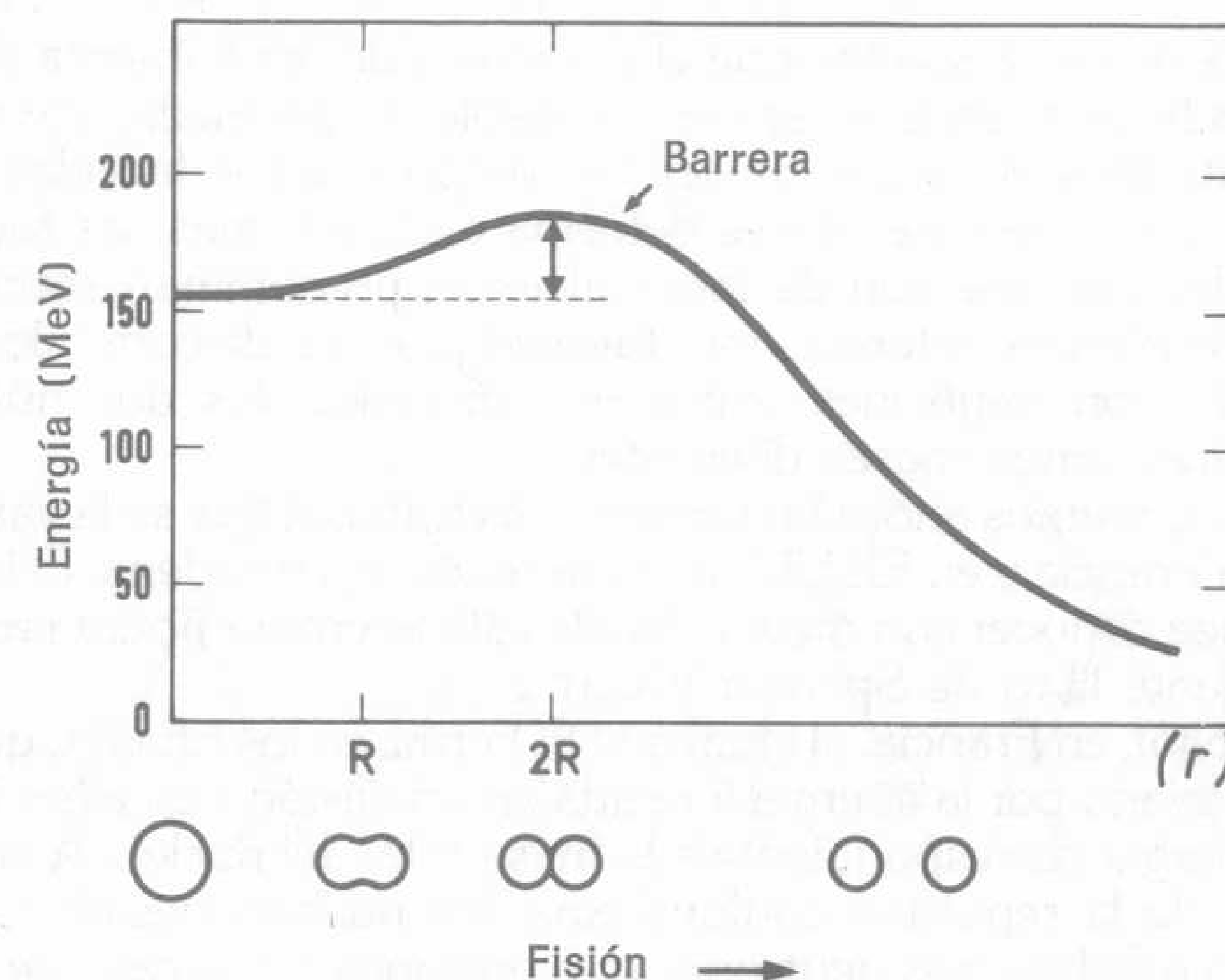
El *Drottningholm* había cruzado ya el Atlántico. Durante todo el viaje, Niels Bohr había discutido acerca de la fisión con su



Fragmento de fisión de un núcleo de uranio fotografiado en la cámara de Wilson por F. Joliot, en 1939. (La capa de uranio está depositada sobre la pared de la cámara, en la parte inferior de la figura).

colaborador Rosenfeld. Al llegar a Nueva York el 16 de enero, fue recibido en el muelle por E. Fermi, su esposa y J. A. Wheeler. La noticia de la fisión se extendía como mancha de aceite. Rosenfeld habló de ella en una reunión en Princeton y N. Bohr comunicó el hecho, el 26 de enero, en la conferencia de física teórica organizada, en Washington, por G. Gamow y E. Teller. De inmediato, una gran animación se apoderó de los asistentes. Algunos se precipitaron al teléfono. Se iniciaron diversos experimentos, en distintas condiciones. En el número de febrero de 1939 de *Physical Review*, aparecieron seis cartas al editor acerca de la fisión, todas con resultados positivos.

Niels Bohr, durante este tiempo, se encontraba en Princeton. Se dio cuenta de que la energía de excitación aportada, al núcleo final, por un neutrón lento, era mayor si formaba con el núcleo blanco un núcleo compuesto que tuviera un número par de neutrones, puesto que su energía de enlace era entonces mayor que si



Esquema de la barrera coulombiana que se opone a la fisión de un núcleo pesado. *r* representa la distancia entre los dos fragmentos de fisión, supuestos idénticos; R es el radio de cada uno de ellos. Debajo de la curva puede verse una representación de las deformaciones sucesivas del núcleo inicial (representado a la izquierda en $r=0$).

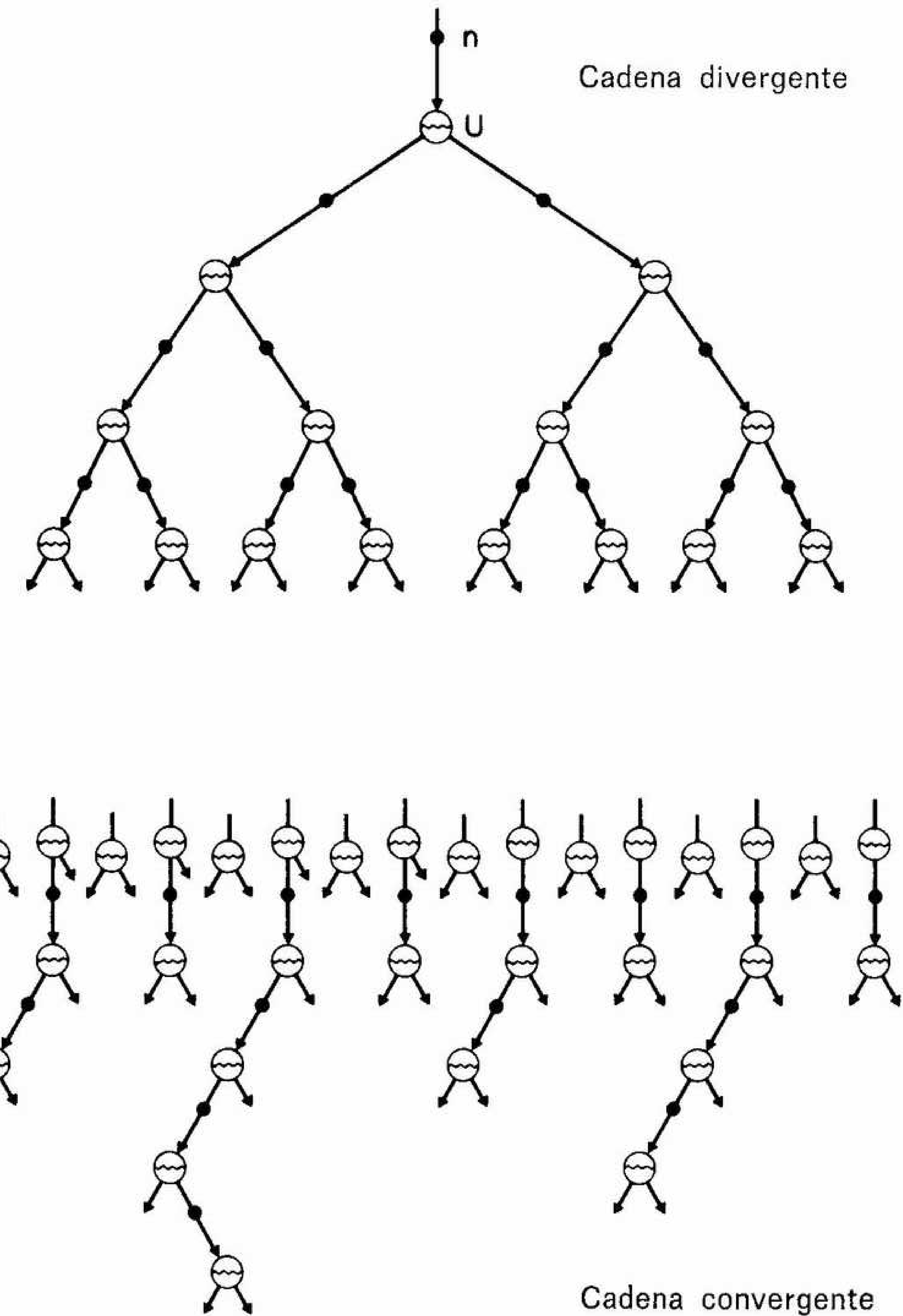
formaba un núcleo compuesto con un número impar de neutrones. Así, un neutrón lento que penetre en un núcleo ^{235}U aportará una energía mayor que si entra en un núcleo ^{238}U. Así, es el ^{235}U, el isótopo escaso del uranio (0,72 %), el que experimenta la fisión con neutrones lentos y no el isótopo más abundante ^{238}U, que sólo podrá ser fisionado con neutrones rápidos. Con J. A. Wheeler, N. Bohr desarrolló una teoría cuantitativa de la fisión. Calcularon las deformaciones que experimenta un núcleo pesado representado por una gota líquida para tal o cual energía de excitación. En un diagrama de una sola dimensión, puede representarse el núcleo inicial, el núcleo en el momento en que se escinde en dos y los dos fragmentos finales, según el esquema de la figura adjunta. Evidentemente, las deformaciones sucesivas del núcleo se desarrollan en el espacio de tres dimensiones. Los dos físicos calcularon, en cada caso, la «barrera» que se opone a la fisión, y por tanto la energía necesaria para superar este umbral, así como la sección eficaz

correspondiente. La repulsión coulombiana entre los protones es cada vez mayor a medida que el número atómico aumenta y, por tanto, la fisión tiene que ser más probable, en promedio (sin tener en cuenta los efectos par-impar). Se comprende con facilidad que, cuando un núcleo pesado se deforma cada vez más, las fuerzas coulombianas; que son de largo alcance, predominan sobre las fuerzas nucleares (interacciones fuertes), que son de corto alcance. La fisión con neutrones lentos es asimétrica: los dos núcleos resultantes tienen masas diferentes.

Describiremos ahora brevemente los trabajos que se llevaron a cabo en Francia y en EE.UU. sobre la reacción en cadena. El lector que desee conocer con mayor detalle esta aventura podrá recurrir al excelente libro de Spencer Weart.

F. Joliot, en Francia, al igual que E. Fermi, en los EE.UU., quedó impresionado por la energía liberada en una fisión, cerca del 1 ‰ de la energía correspondiente a la masa total del núcleo. A consecuencia de la repulsión coulombiana, los núcleos pesados comprenden muchos más neutrones que protones. En el caso de ^{236}U, 92 protones y 144 neutrones. La fisión da dos núcleos más ligeros, de masa media, cuyos isótopos estables tienen un número de neutrones más próximo al número de protones (ejemplos: $^{84}_{36}Kr_{48}$ ó $^{139}_{57}La_{82}$). Aparece pues un exceso de neutrones en la fisión (de 15 a 20). Este exceso puede desaparecer de dos maneras: pueden formarse en la fisión unos isótopos radiactivos muy excedentarios en neutrones en los que, por una serie de radiactividades β^- sucesivas[1], algunos de sus neutrones se transformen, uno a uno, en protones; puede producirse también, en el momento de la fisión, la emisión de algunos neutrones. Si tuviera realmente lugar una emisión así, quizás estos neutrones, a su vez, pudieran provocar nuevas fisiones, con lo que se obtendría una reacción en cadena susceptible de liberar una gran cantidad de energía a escala macroscópica. Así, por ejemplo, si cada fisión liberara por término medio dos neutrones que a su vez actuaran sobre otros núcleos, se tendría la sucesión 2, 4, 8, 16, 32... fisiones; sería entonces una reacción en cadena *divergente*. Por el contrario, si cada fisión produjera, por término medio, menos de un neutrón susceptible de

[1] Una serie así de radiaciones β^- sucesivas comprende, a veces, la emisión de un neutrón denominado «diferido», cuando la diferencia de energía entre núcleos vecinos lo permite.



Los dos tipos de reacciones en cadena: *a*. Cadena divergente, donde el número de neutrones eficaces por fisión es superior a 1, y se producirá rápidamente una liberación considerable de energía. *b*. En el segundo caso (cadena convergente), el número de neutrones eficaces por fisión es inferior a 1, y la reacción, si bien ocurre, no proporcionará una liberación importante de energía.

provocar una nueva fisión, por ejemplo 0,5 neutrones (un neutrón activo por cada dos fisiones), se tendría entonces la sucesión siguiente, partiendo de 16 fisiones: 16, 8, 4, 2, 1, que correspondería a una reacción en cadena *convergente*, que se detendría espontáneamente (véase figura pág. 139).

Por lo tanto, había que comprobar de manera experimental si la fisión liberaba neutrones. F. Joliot formó, en febrero de 1939, un equipo de trabajo con Hans von Halban y Lew Kowarski y acometieron el problema. Al otro lado del Atlántico, con algunas semanas de intervalo, iniciaron sus experimentos, en la Universidad de Columbia, E. Fermi y H. L. Anderson, y también Zinn y Szilard. El equipo del Collège de France reveló en primer lugar que realmente se producía una emisión de neutrones en la fisión. Trataron a continuación de medir su energía y lograron encontrar que se emitían neutrones de energía superior a 2 MeV; tales neutrones son, en efecto, capaces de provocar la reacción $^{32}S(n,p)^{32}P$, que se evidencia debido a la formación de ^{32}P radiactivo (experimento realizado en colaboración con M. Dodé). Trataron después de determinar el número de neutrones emitidos en cada fisión, y encontraron que era de $3{,}5 \pm 0{,}7$.

Este número, un poco optimista, les animó a proseguir. Se sabe hoy que este número es próximo a 2,45.

En EE.UU., el equipo de Columbia, realizó poco después unas mediciones análogas, pero encontró un número más pequeño.

L. Szilard, que había tenido que huir del régimen nazi, y que temía que Hitler pudiera darse cuenta de las posibles aplicaciones de la fisión, y realizara una nueva arma de destrucción aterradora, se esforzaba en convencer a sus colegas de no publicar sus resultados relativos a la fisión. Escribió a Joliot, el cual, si bien estaba de acuerdo en el principio, no quería seguir esta sugerencia mientras no actuaran de común acuerdo todos los laboratorios implicados. Algunos meses más tarde, la guerra llevaría sin embargo, a todos los protagonistas a no publicar nada acerca de este tema en las revistas científicas. El equipo del Collège de France depositó así, el 30 de octubre de 1939, en la Academia de Ciencias, un sobre cerrado y lacrado que no sería abierto hasta el 18 de agosto de 1948.

Los neutrones lentos son casi doscientas veces más eficaces que los neutrones rápidos para provocar la fisión del uranio 235. Halban, Joliot y Kowarski, una vez demostrado que los neutrones secundarios producidos en una fisión son rápidos, llegaron a la

conclusión —en colaboración con Francis Perrin— que era preciso frenarlos mediante choques sucesivos, por ejemplo con el hidrógeno del agua, para lograr realizar una reacción en cadena. Entre el 1 y el 4 de mayo de 1939, estos científicos registraron tres patentes a nombre de la Caja Nacional de la Investigación Científica (CNRS) acerca de un dispositivo de producción de energía y sus diferentes desarrollos posibles.

Para controlar y regular este dispositivo que, más tarde, recibirá el nombre de pila o reactor atómico, los inventores proponían emplear absorbentes de cadmio.

El equipo quería pasar a la realización práctica de la idea. F. Joliot acudió a Bruselas, a la Unión Minera del Alto Katanga, que disponía de importantes yacimientos de uranio y con la que Marie Curie y el Instituto del Radio habían trabajado largos años. La Unión Minera prometió cinco toneladas de óxido de uranio para los experimentos preliminares. El equipo del Collège de France inició sus ensayos mezclando óxido de uranio y agua en esferas de diámetro cada vez mayor. En efecto, un gran número de neutrones escapaban del dispositivo por su superficie, que es proporcional al cuadrado del radio, mientras que el número total de fisiones es un efecto de volumen, proporcional al cubo del radio. Había pues interés en construir dispositivos cada vez mayores. Primero fueron esferas de 30 cm, luego de 50 cm y por último de 90 cm de diámetro. Ante la importancia de las cantidades de material a manipular, el equipo se instaló, en julio de 1939, en el Laboratorio de Síntesis Atómica de Ivry. Logró realizar una reacción en cadena convergente. Apareció una dificultad pues el uranio 238 es susceptible de «tragarse» los neutrones, absorbiéndolos por resonancia, antes de que estén completamente frenados. L. Kowarski, mientras tomaba un baño, «una situación claramente favorable a la idea de neutrones dispersándose en un medio líquido», como dijo después, encontró una solución: bastaba con no mezclar de forma homogénea el uranio y el retardador (que después se denominó moderador), sino disponerlos de forma heterogénea, alternando las masas de retardador y de óxido de uranio; los neutrones de fisión podrían salir del uranio, para difundirse a continuación y ser frenados en el moderador hasta una energía inferior a la región de las resonancias, antes de regresar, eventualmente, al uranio y provocar nuevas fisiones del uranio 235. Se ensayó un dispositivo heterogéneo así, a partir de finales del año 1939. El equipo pensaba también en enriquecer isotópicamente el uranio natural en uranio 235, para

conseguir una reacción en cadena divergente, pero el esfuerzo necesario parecía fuera de su alcance.

En las primeras semanas de la guerra, F. Joliot obtuvo el apoyo del ministro de Armamento, Raoul Dautry. Algo más tarde, el equipo se dio cuenta de que el agua pesada, D_2O (un agua en la que el deuterio reemplaza al hidrógeno), es un moderador mejor que el agua ordinaria, puesto que el deuterio, al contrario del hidrógeno, absorbe muy poco los neutrones. Pero, ¿dónde conseguir agua pesada? Sólo una empresa, en el mundo, la fabrica: Norsk Hydro, en Noruega. R. Dautry, a solicitud de Joliot, enviará un grupo, mandado por el teniente Jacques Allier, a Noruega, para adquirir y llevar a Francia lo que constituía, en aquel momento, toda la reserva mundial de agua pesada, 185,5 kilogramos, en 26 bidones.

En abril de 1940, F. Joliot y sus colaboradores comenzaron a interesarse por la utilización de grafito como moderador; el avance de las tropas alemanas interrumpió sus trabajos. De acuerdo con Joliot, Halban y Kowarski, provistos de una orden oficial, embarcaron con la reserva de agua pesada y planos de los experimentos a realizar, en Junio de 1940, en Burdeos, hacia Inglaterra.

En Nueva York, en la Universidad de Columbia, Fermi y sus colaboradores estudiaron pilas cada vez mayores de óxido de uranio y grafito. Al principio tuvieron problemas por la falta de medios y las dificultades para obtener ciertos materiales necesarios en gran cantidad. Se dieron cuenta que debían emplearse productos especialmente puros. Entretanto, G. B. Pegram presentó una solicitud al departamento de Marina y, en otoño de 1939, por iniciativa de Szilard y Wigner, A. Einstein escribió al presidente Roosevelt para llamar su atención sobre las posibles aplicaciones de la fisión y la necesidad de un esfuerzo norteamericano en este campo, frente a la amenaza del nazismo. Como es sabido, después de la ocupación de gran parte de Europa continental por los ejércitos alemanes y del ataque a Pearl Harbor, el gobierno norteamericano se lanzó por éste camino y el esfuerzo fue considerable.

Fermi y su equipo abandonaron, en 1942, la Universidad Columbia y pasaron a la Universidad de Chicago y, el 2 de diciembre de 1942, bajo la gradería del estadio universitario, funcionó la primera pila atómica y llegó a las condiciones críticas de la reacción en cadena divergente.

A partir de principios de 1943, se creó un enorme laboratorio en Los Álamos, en una meseta de Nuevo México. Se construyeron allí, bajo la dirección de J. R. Oppenheimer, las primeras bombas atómicas norteamericanas que empleaban la energía liberada en la fisión.

4. LOS VERDADEROS TRANSURÁNICOS

En mayo de 1940, en la Universidad de California, en Berkeley, E. McMillan y P. H. Abelson estudiaban los fragmentos de fisión del uranio. Se disponía una capa delgada de óxido de uranio sobre una delgada hoja de papel de fumar, y los fragmentos de fisión se recogían sobre otras hojas de papel de fumar o sobre una película de colodión colocadas enfrente. Se dieron cuenta de que dos de las radiactividades inducidas no dejaban nunca la capa de óxido de uranio: una actividad de 23 minutos propia de un isótopo del uranio, y una actividad que correspondía a su descendiente, de 2,3 días de período. Las separaciones químicas, en especial, revelaron que la sustancia de 23 minutos de período era ^{239}U, como habían previsto Lise Meitner y O. R. Frisch, y que la de período 2,3 días correspondía a un nuevo elemento, de número atómico 93, que poseía propiedades químicas análogas a las del uranio, al que se dio el nombre de neptunio, por el del planeta situado a continuación de Urano. Era el primer elemento más allá del uranio, creado artificialmente por el hombre.

A finales de 1940, bombardeando uranio con deuterones, G. T. Seaborg y diversos otros físicos, entre ellos McMillan, obtuvieron otro isótopo del neptunio, ^{238}Np, en el que apareció una radiactividad alfa correspondiente a su descendiente inmediato, un isótopo del elemento de número atómico 94, elemento que después se denominó plutonio (por el planeta Plutón). A causa de las consignas de secreto, en todos los documentos, se le denominó al principio «cobre», que hubo que distinguir del auténtico cobre, que se designó entonces como «cobre de buena fe» («honest-to-God-copper»). El mismo equipo, al cual se había unido E. Segrè, descubrió el plutonio 239, que se formaba en el neptunio 239, emisor de una radiación alfa con un período de 24.400 años, y que se había predicho que sería especialmente fisible. (Fue utilizado, después, para la segunda bomba atómica norteamericana).

Fue más difícil sintetizar y evidenciar los dos transuránicos siguientes: el elemento 95 y el elemento 96. Sólo se consiguió después de haber reconocido que todos estos elementos formaban

parte de una nueva serie que empezaba con el actinio, análoga a sus homólogos inferiores, las tierras raras; a los elementos de esta serie se les denominó actínidos. Al contrario de otros elementos de una misma fila de la tabla de Mendeleiev, que van llenando progresivamente su última capa con electrones (la cual determina sus principales propiedades), para los elementos de la serie de las tierras raras (que empieza con el lantano y termina con el lutecio), así como para los elementos de la serie de los actínidos, es una capa electrónica interna la que se va llenando progresivamente. Debido a esto, todos los elementos de una misma serie tienen propiedades químicas y físicas muy parecidas.

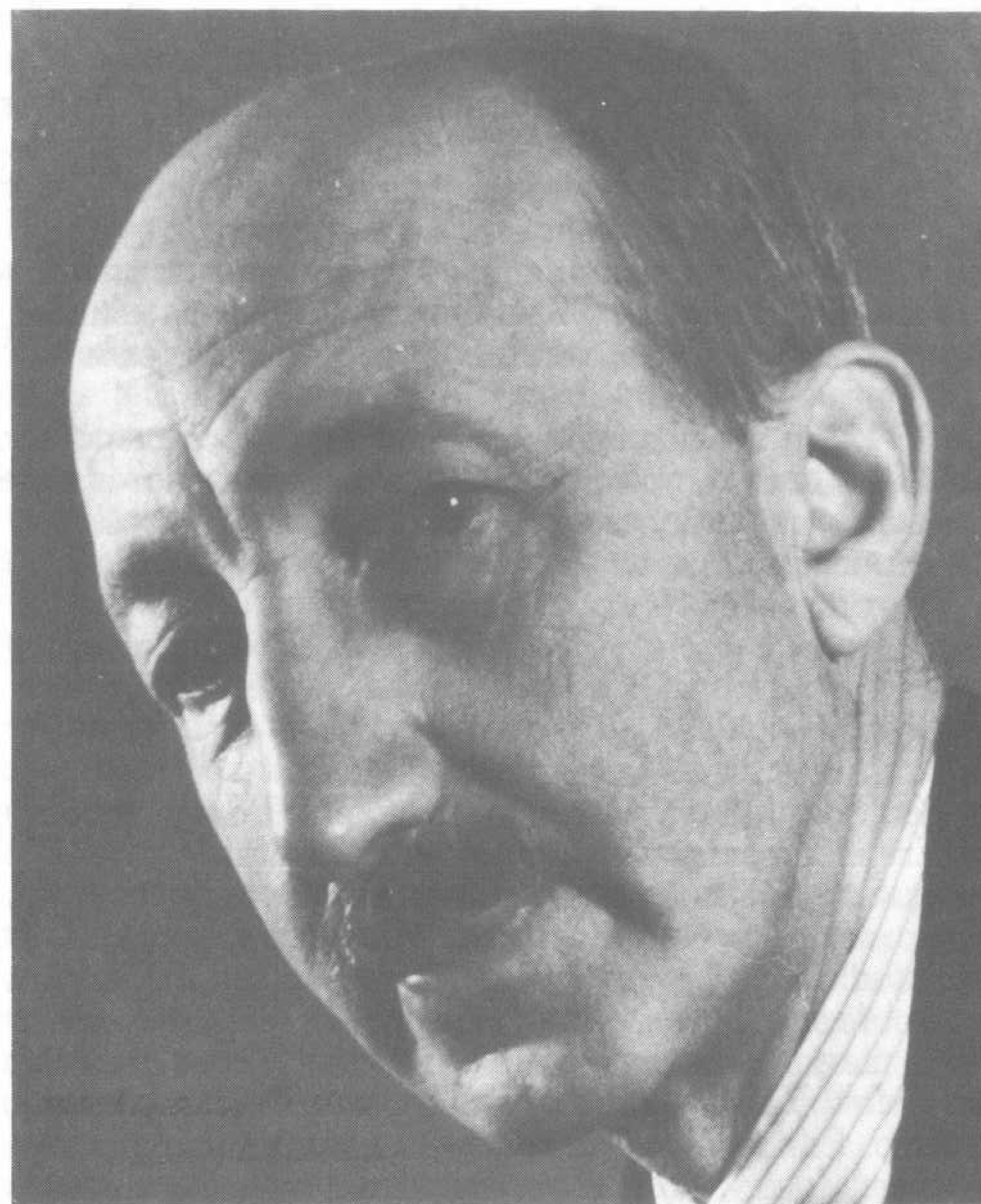
El isótopo del elemento 96, el curio 242, por el nombre de Pierre y Marie Curie, fue producido en Berkeley, por Seaborg y sus colaboradores, en verano de 1944, por irradiación, en el ciclotrón, de una muestra de plutonio 239 con partículas alfa de 32 MeV. El elemento 95, el americio —denominado así por analogía con su homólogo inferior, el europio—, fue descubierto por el mismo equipo de Berkeley, algunos meses después, bajo la forma de su isótopo ^{241}Am.

5. ALGUNOS PROTAGONISTAS

Georg de Hevesy

Nacido en Budapest, el 1 de agosto de 1885, Georg de Hevesy era hijo de Luis de Hevesy, consejero en la corte, y de Eugenia, baronesa Schosberger. Cursó sus estudios en Hungría y en Alemania, y obtuvo el doctorado en la Universidad de Friburgo de Brisgovia, en 1908.

Después de dos años en Suiza, en Zurich, e investigaciones en Karlsruhe con F. Haber, fue a trabajar en Manchester, bajo la dirección de Rutherford, y después al Instituto del Radio de Viena, donde empleó, por vez primera, con Fritz Paneth el radio D radiactivo como indicador del plomo. Dio clases, a partir de 1913, en la Universidad de Budapest. De esta época, una de sus colaboradoras, Elisabeth Rona, refirió que de Hevesy trabajaba cuidadosa y lentamente, y que dejaba mucha libertad a sus alumnos. Su cultura general era muy grande. De su estancia en Inglaterra, había mantenido la costumbre de tomar el té a las cinco y, la llevaba a menudo a la pastelería de enfrente, casa Gerbaud, a tomar unas golosi-



Georg de Hevesy.

nas para acompañar el té mientras seguían discutiendo sobre el trabajo.

Cuando se declaró la Primera Guerra Mundial, de Hevesy estaba en Holanda, camino de Oxford, donde iba a trabajar con Moseley sobre las tierras raras.

En 1920, acudió a Copenhague, para la inauguración del Instituto de Física Teórica, del que fue asociado toda su vida. En 1922, estudió, con Dirk Coster, los minerales de circonio en los

cuales descubrieron el elemento 72, que denominaron hafnio (nombre latino de Copenhague).

Contrajo matrimonio con Pia Riis, en 1924.

En 1926, fue nombrado profesor de química física en Friburgo, Alemania. Dedicó gran parte de sus trabajos a desarrollar los métodos de utilización de los isótopos radiactivos, como trazadores para estudiar los metabolismos de los seres vivos.

En 1935, en Copenhague, empleó por primera vez un radioelemento artificial, el fósforo 32, como indicador para estudiar, en colaboración con Chievitz, el metabolismo del fósforo en la rata. Se refugió en Suecia en 1943.

En 1944, obtuvo el premio Nobel de Química, correspondiente al año 1943, por el empleo de isótopos como trazadores radiactivos en sus investigaciones sobre los procesos químicos.

Murió en Friburgo de Brisgovia, Alemania, el 5 de julio de 1966.

Enrico Fermi

Enrico Fermi nació en Roma, Italia, el 29 de septiembre de 1901. Era el tercer hijo de Ida de Gattig, institutriz, y de Alberto Fermi, que trabajaba en la administración de los ferrocarriles.

Enrico realizó sus estudios secundarios en el Liceo Humberto I, donde estudió latín, griego y francés. Desde muy joven, Enrico tenía la costumbre de ir a buscar a su padre por la tarde, a su despacho, y volvían a pie a su casa, acompañados a menudo por un colega de Alberto Fermi, Adolfo Amidei, ingeniero, que se asombró de que a los 13 años Enrico ya se interesara tanto por las matemáticas. Le había prestado un libro de geometría descriptiva y quedó muy sorprendido cuando al devolvérselo, Enrico le dijo que había resuelto los doscientos problemas que planteaba el libro. También tenía mucha habilidad manual. Muy joven, con su hermano, construía motores eléctricos, juguetes mecánicos e incluso maquetas de aviones que podían volar.

Su hermano mayor Julio era su único amigo. Murió súbitamente, en 1915, y Enrico sufrió cruelmente por ello. Pasó entonces largas horas en las bibliotecas leyendo obras científicas. Uno de sus libros preferidos era *Elementa Physicae Mathematicae* de Andrea Caraffa, S. J., editado en 1840, que le apasionó tanto que no se dio cuenta de que estaba escrito en latín.

En 1918, cuando apenas contaba 17 años, dejó Roma para ir a estudiar a Pisa, en la Escuela Normal Superior; sorprendió a sus maestros por la calidad de su disertación en el examen de ingreso. Encontró allí a su amigo Franco Rasetti. En julio de 1922, Fermi obtuvo su doctorado en Física, defendiendo una memoria sobre la refracción de los rayos X en las superficies cristalinas. Consiguió, en 1922, una beca para estudiar en Gotinga bajo la dirección de Max Born, y después en Leiden, durante tres meses, con P. Ehrenfest. Dio clases durante cierto tiempo en Florencia y, en otoño de 1926, Fermi se instaló en Roma. El senador Orso Mario Corbino, entonces jefe del departamento de física en la Universidad de Roma, deseaba llevar a su departamento a un grupo de físicos jóvenes. De este modo, Corbino hizo venir igualmente a F. Rasetti, Edoardo Amaldi y después Emilio Segrè. Corbino les llamaba «sus muchachos», y constituyeron el núcleo de un equipo que trabajó durante muchos años en perfecta armonía. No olvidemos, entre los amigos de Fermi de esta época, a Ettore Majorana, un matemático de notable inteligencia. Un día Fermi y él se desafiaron para ver quien obtendría primero el resultado de un cálculo; Fermi lo realizaba con regla de cálculo y Majorana sólo empleaba su cerebro. Terminaron a la vez.

El 19 de julio de 1928, contrajo matrimonio con Laura Capon, una joven estudiante de ciencias. Laura escribió, mucho más tarde, la vida de la familia en un libro titulado *Átomos en familia*, en el que nos revela los sobrenombres que se daban a cada uno de los miembros del equipo: Segrè recibió el nombre de «basilisco», pues era muy susceptible y, cuando se molestaba, sus ojos podían lanzar llamas como este animal monstruoso. A Fermi, le llamaban «el Papa»; cuando explicó a sus camaradas «la teoría de los cuantos, en toda su extensión y en toda su profundidad, el grupo la encontró difícil de comprender y extraña a sus formas de pensar. Que la materia y la energía consistan en haces de ondas es más un dogma que una verdad que se pueda probar mediante razonamientos, objetaron... En materia de fe, el Papa es infalible. En lo que concierne a la teoría de los cuantos, Fermi es infalible, y por tanto Fermi es el Papa». Rasetti fue apodado el «Cardenal Vicario», dado que era el más cualificado para reemplazar a Fermi. Majorana, que trataba de llevar siempre más lejos sus razonamientos, era el «Gran Inquisidor». Bruno Pontecorvo llegó más tarde al equipo. Fue «el chaval».

Fermi fue siempre fiel a sus amigos de juventud; siempre generoso en su trabajo científico: cuando veía que se abría ante él

una nueva vía, llamaba a sus colaboradores para que fueran a compartir con él sus experiencias y sus logros.

Enrico Fermi fue ante todo un teórico. Desarrolló una nueva estadística para las partículas de spin 1/2 (denominadas hoy fermiones). En 1933, estableció una teoría de la radiactividad beta.

Cuando se enteró del descubrimiento de la radiactividad artificial por los Joliot, pasó de teórico a experimentador, actitud que adoptaría, en un sentido o en otro, repetidas veces durante su vida científica. Utilizó los neutrones para obtener numerosos radioelementos artificiales nuevos. Con su equipo, evidenció y explicó las notables propiedades de los neutrones lentos. En estos experimentos, él y sus colegas necesitaron una gran cantidad de agua. Por lo que, sin dudarlo, pensaron en emplear el gran estanque que los Corbino poseían en el jardín de la universidad. «A pesar de la lluvia de neutrones, los peces rojos conservaron su calma y su dignidad mucho más que la muchedumbre de la orilla» (Laura Fermi).

El 10 de diciembre de 1938, Fermi obtuvo el premio Nobel de Física, pero desde Estocolmo —donde rehusó hacer el saludo fascista al rey, como se le había pedido— embarcó hacia Estados Unidos con su mujer, de origen judío, temerosos de los efectos de las nuevas leyes racistas en Italia. Había previsto en principio una estancia de seis meses en las universidades norteamericanas, pero tomaron la decisión de quedarse definitivamente en Estados Unidos cuando se ofreció a E. Fermi una cátedra de física en la Universidad Columbia, en Nueva York.

En Nueva York, Fermi empezó sus primeros trabajos sobre la reacción en cadena, pero el responsable del proyecto, A. H. Compton, hizo transferir estos estudios a Chicago, donde Fermi, puso en marcha, el 2 de diciembre de 1942, la primera pila atómica, instalada bajo la tribuna de la sala de squash de la universidad. Los físicos y los técnicos que construyeron esta pila iban todos negros, como mineros, a causa del grafito que manipulaban todo el día. El presidente Roosevelt se enteró del funcionamiento de esta pila por el siguiente mensaje cifrado, que le envió Compton: «El navegante italiano ha llegado al Nuevo Mundo.» Y del nombre de todos los que se encontraban aquel día en la pista de squash sólo quedó constancia, por sus firmas, en una botella de chianti.

Su joven colaborador H. L. Anderson le enseñó las expresiones particulares, las costumbres y los usos norteamericanos. Se nacionalizó norteamericano en 1944, tras varios años en los que tener una nacionalidad enemiga le valió numerosas vejaciones.



Enrico Fermi, en la Universidad de Chicago.

Durante la guerra, explica S. K. Allison, no tenía derecho a viajar en avión. A Enrico Fermi esto le molestaba mucho y, un día, que viajaba en tren con Compton y Allison, demostró su fastidio durante todo el viaje, hasta que Compton le planteó el siguiente problema: «Cuando estaba en los Andes, observé que, a gran altitud, mi reloj dejaba de señalar la hora exacta. He reflexionado sobre esto y creo que tengo la explicación. Veamos qué es lo que

usted piensa de ello.» Los ojos de Fermi brillaron de placer ¡Un problema! ¡Un tema sobre el cual reflexionar! Tomó un papel y su famosa regla de cálculo y, durante cinco minutos, escribió ecuaciones sobre el efecto del aire sobre el volante del reloj... y, muy satisfecho, llegó a una solución. Compton quedó maravillado del resultado obtenido.

En el transcurso del verano de 1944, Robert Oppenheimer pidió a Enrico Fermi que se trasladara al punto Y —el laboratorio de Los Álamos, en Nuevo Méjico, donde se construía la bomba atómica— con su mujer y sus dos hijos. Fermi encontró allí diversos europeos que habían huido de sus países, como Niels Bohr, E. Segrè, Hans A. Bethe, Edward Teller, Rudolph Peierls. En Los Álamos, cada físico era conocido por un seudónimo, que sólo conservaba las iniciales del nombre y apellido de cada uno. Así, Enrico Fermi se llamaba Eugène Farmer.

En 1946, regresó a Chicago para proseguir sus clases.

A Fermi le gustaba especialmente la enseñanza, que parecía ser una parte esencial de su personalidad. Su claridad de espíritu hacía que las explicaciones fueran simples y claras cuando exponía un tema.

Le apasionaba la nueva física que podía realizarse con el novísimo sincrociclotrón de la Universidad de Chicago, capaz de producir mesones π, vectores de las fuerzas nucleares; entraba así en la física de las altas energías en la que realizó muchas predicciones.

Durante este período, realizó frecuentes viajes a Europa, especialmente a Italia, donde podía dedicarse a su pasión, el alpinismo.

En el verano de 1954, durante sus vacaciones en los Alpes, Fermi notó los primeros signos de su enfermedad. A su regreso ingresó en un hospital, donde le diagnosticaron un cáncer de estómago. Todos sus amigos admiraron su entereza moral a lo largo de la enfermedad.

Enrico Fermi murió el 29 de noviembre de 1954.

El Instituto de Estudios Nucleares de la Universidad de Chicago lleva hoy su nombre. El Laboratorio del Acelerador Nacional, en Batavia, cerca de Chicago, construido a instigación de Robert Wilson, comprende un edificio de dieciséis pisos inspirado en la catedral de Beauvais; cobija el mayor acelerador norteamericano destinado al estudio de las partículas subnucleares y lleva el nombre de Fermilab.

Otto Hahn

Otto Hahn nació en Frankfurt del Main, Alemania, el 8 de marzo de 1879. Su padre, de origen campesino, era vidriero y transformó su pequeño taller artesanal en una floreciente empresa.

De niño, mientras su padre soñaba con hacer de él un arquitecto, Otto Hahn realizaba experimentos de química en el lavadero de la casa familiar. Ya tenía fama de poseer una memoria extraordinaria.

En 1897, inició estudios de química, en Munich y, después, en Marburgo.

Para perfeccionar sus conocimientos de inglés, O. Hahn se trasladó a la Universidad de Londres, junto a William Ramsay, que había descubierto los gases nobles, y en cuyo laboratorio empezó a interesarse en la radiactividad natural que acababa de ser descubierta. Hahn entrevió la posibilidad de que existiera un elemento aún desconocido, el radiotorio, padre del torio X. Solicitó a Rutherford, entonces en Montreal, una plaza para ir a trabajar con él. Éste, que no creía en el radiotorio, cuya existencia sólo se había establecido químicamente, inició a O. Hahn en la física de los rayos alfa. En Montreal, Otto Hahn descubrió el torio C, que emite radiación alfa y beta de corto período, así como el radioactinio. Su estancia en Canadá le marcó profundamente. Dijo haber encontrado allí, para el resto de su vida, una escala de valores.

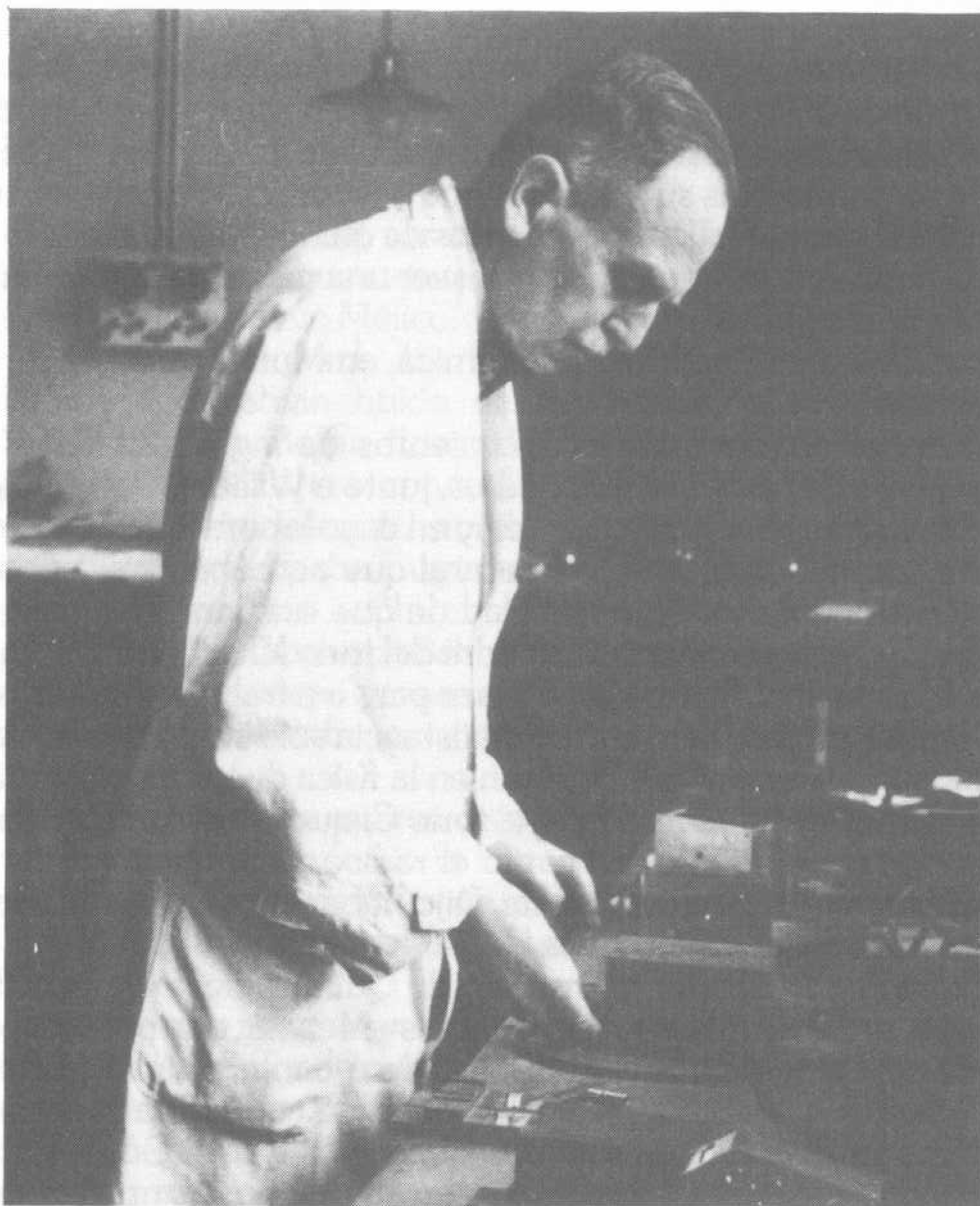
Regresó a Alemania, al Instituto de Química de la Universidad de Berlín, donde conoció, en 1907, a Lisa Meitner, que procedía del Instituto del Radio de Viena. Emprenderá con ella una colaboración de treinta años, después de haberle sido confiada a Hahn una división de radiactividad en el nuevo Instituto Kaiser Guillermo de Química; su colaboración quedó interrumpida un tiempo durante la guerra de 1914-1918.

En marzo de 1913, Otto Hahn había contraído matrimonio con Edith Junghans, profesora de diseño.

Se debe a Otto Hahn el descubrimiento del mesotorio y después del protactinio, en colaboración con Lise Meitner. Puso de manifiesto la isometría nuclear, en 1921, sobre el uranio Z.

Se interesó también en la formación de los isótopos del estroncio, que está en la base del método de datación conocido hoy como método del rubidio-estroncio.

A lo largo de estas investigaciones, O. Hahn dio pruebas de unas aptitudes de químico particularmente notables. Con una



Otto Hahn en su laboratorio, en la época del descubrimiento de la fisión.

honestidad intelectual rigurosa, no dejaba de lado ningún hecho pequeño; muy perseverante, manipulaba con gran cuidado y mucha precisión; muy concienzudo, anotaba todos los *si* y los *pero* en su cuaderno de laboratorio. Cuando se le preguntaba cómo podía lograr una limpieza tan grande en sus experimentos de química, respondía simplemente: «Pues, bueno, nos lavamos a menudo las manos.»

Con Lise Meitner y después con Fritz Strassmann, se lanzó, desde 1935, al estudio de lo que entonces se creía que eran los transuránicos. A finales de 1938, con F. Strassmann, y gracias a un análisis químico meticuloso, descubrió la fragmentación del uranio en dos núcleos más ligeros, fenómeno que fue denominado fisión. *«Unser Chef, der Otto Hahn, spaltet fleissig das Uran»*[1], cantaban después del descubrimiento los jóvenes investigadores del Instituto Kaiser Guillermo de Berlin-Dahlem. Por este trabajo, O. Hahn recibió, en 1945, el premio Nobel de Química correspondiente al año 1944. El gobierno nazi había deseado que rehusara al premio. No pudo ir a recibirlo hasta fines de 1946.

A la llegada de las tropas aliadas en Alemania, Hahn con algunos de sus colegas fue conducido durante algunos meses a Inglaterra. Después de su vuelta, se instaló en Gotinga, donde trabajó en la transformación de la Sociedad Kaiser Guillermo en Sociedad Max Planck, de la que fue el primer presidente, de 1946 a 1960.

Puso en guardia a sus compatriotas contra toda utilización inhumana de los descubrimientos científicos.

Otto Hahn tenía una personalidad muy fuerte y muy rica. Aunque era modesto, celebraba su creciente popularidad. «Creo que soy célebre, decía, pero no soy más que un químico.» Era un buen alpinista y realizaba ascensiones sin guía con toda facilidad. O. Hahn amaba la música. Se dice que cantaba, como tenor, en una coral dirigida por Max Planck antes de la Primera Guerra Mundial.

Otto Hahn, maestro insuperado en el arte de identificar las sustancias radiactivas, murió en Gotinga, el 28 de julio de 1968.

Glenn T. Seaborg

G. T. Seaborg nació en Ishpening, Michigan, EE.UU., el 19 de abril de 1912.

A la edad de 12 años, se instaló con su familia cerca de Los Ángeles. Entró en la Universidad de California, en 1929, donde obtuvo un diploma de química, en 1934; después fue a Berkeley y defendió su doctorado en química (Ph. D.), en 1937. Realizó investi-

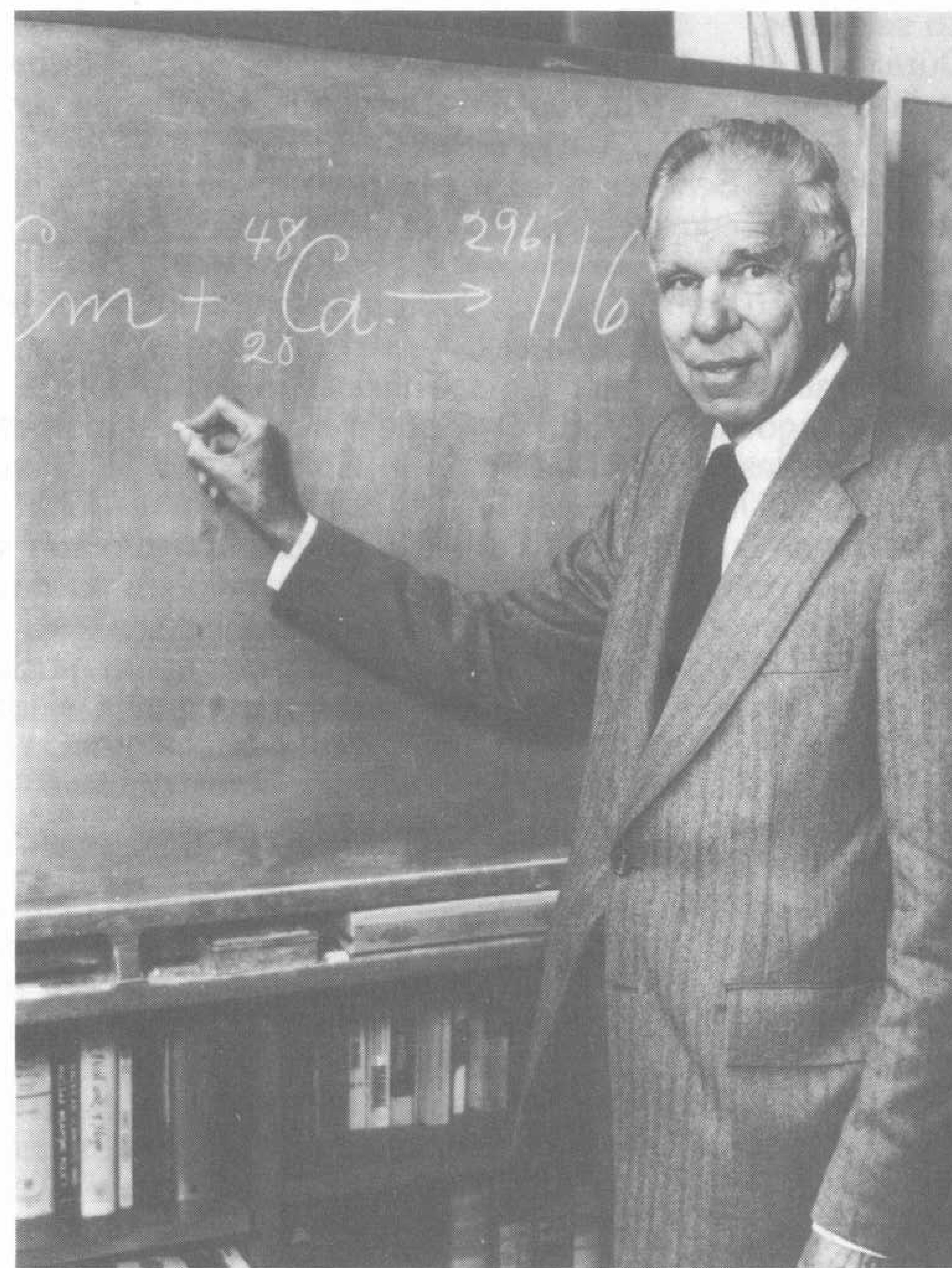
[1] «Nuestro jefe Otto Hahn fisiona con gran aplicación el uranio.»

gaciones en el Radiation Laboratory de Berkeley, como ayudante de G. N. Lewis, con el cual publicó numerosos artículos.

En 1940-1941, Seaborg y sus colegas encontraron el segundo transuránico, el elemento 94, denominado plutonio, uno de cuyos isótopos es especialmente fisible; a continuación, descubrió con sus colaboradores otros nueve elementos transuránicos: el americio, el curio, el berkelio, el californio, el einstenio, el fermio, el mendelevio, el nobelio y el elemento 106.

En sus memorias, Seaborg explica, a propósito de los nombres dados a estos elementos, la anécdota siguiente. La revista *New Yorker* escribió en la sección «Lo que se cuenta en la ciudad»: «Están apareciendo hoy nuevos átomos con una frecuencia espectacular, por no decir alarmante, y la Universidad de California, en Berkeley, cuyos investigadores acaban de descubrir los elementos 97 y 98, los ha bautizado con el nombre de berkelio y californio respectivamente. Aunque no hay duda de que están adaptados a su lugar de nacimiento, tales nombres nos sorprenden por la asombrosa falta de sentido de las relaciones públicas de esta universidad, que sin embargo, está situada en un Estado en el cual la publicidad se ha desarrollado hasta un grado que sólo es comparable con el evangelismo. Los industriosos sabios de California producirán, muy probablemente uno o dos elementos más en los próximos días, y la universidad tendría que haberlo previsto. Ha perdido para siempre la posibilidad de inmortalizarse en la tabla periódica de los elementos con una secuencia como Universitium (97) Ofium (98) [of, en inglés, significa de], Californium (99), Berkélium (100).» Los científicos respondieron al *New Yorker:* «El cronista del *New Yorker* no ha visto la implicación de sus comentarios sugiriendo nuevos nombres para los elementos 97 y 98. Quizás hemos demostrado, al denominar estos elementos berkelio y californio, una falta de confianza, pero no una falta de previsión. Bautizándolos así, hemos evitado la posibilidad de que, si los hubiéramos llamado Universitium y Ofium, los neoyorquinos descubrieran los elementos 99 y 100 y les dieran entonces el nombre de Newium y Yorkium.» La respuesta de la redacción del *New Yorker* fue breve: «En nuestras oficinas-laboratorio ya estamos trabajando sobre el newium y el yorkium. Hasta ahora, hemos encontrado apenas los nombres.»

Fue Seaborg quien, en 1944, emitió la hipótesis de una nueva serie de elementos químicos, empezando con el actinio, análoga a la serie de las tierras raras, y que denominó actínidos.



Glenn T. Seaborg.

El equipo de G. T. Seaborg ha identificado más de 100 isótopos entre los cuales hay algunos que tienen aplicaciones en medicina y en la industria. A lo largo de sus investigaciones han registrado más de cuarenta patentes.

Seaborg contrajo matrimonio, el 16 de junio de 1942, con

Helen L. Griggs, entonces secretaria de Ernest O. Lawrence. Han tenido seis hijos.

Durante la guerra, a partir de abril de 1942, dirigió los trabajos sobre la química del plutonio en el proyecto Manhattan, en la Universidad de Chicago, hasta mayo de 1946.

En 1945, G. Seaborg pasó a ser profesor de química de la Universidad de Berkeley.

Obtuvo el premio Nobel de Química, en 1951, con E. N. McMillan, por su trabajo acerca de la química de los elementos transuránicos.

Fue nombrado canciller de la Universidad de California, en Berkeley, en agosto de 1958, cargo que ejerció hasta el momento en que se le designó presidente de la Comisión de la Energía Atómica de EE.UU., en 1961.

Después de su regreso a Berkeley, en 1971, siguió con sus clases y con su trabajo de investigación sobre la radioquímica de los iones pesados y de los elementos transuránicos.

De 1972 a 1975, fue director de la división de química nuclear del famoso Lawrence Berkeley Laboratory, denominado en otro tiempo Radiation Laboratory.

7. LA RADIACTIVIDAD HOY

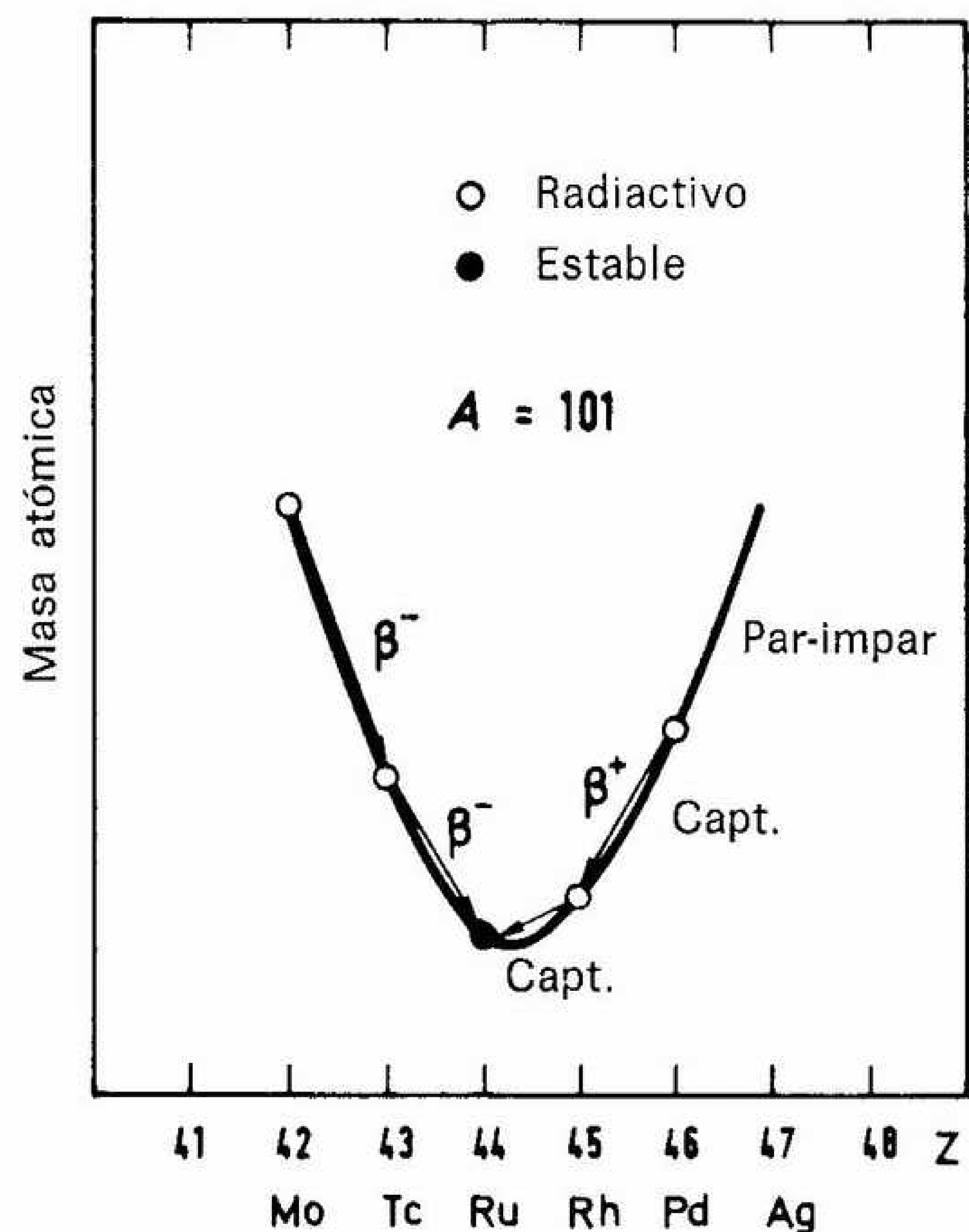
1. DEL VALLE DE ESTABILIDAD A LOS NÚCLEOS EXÓTICOS

Desde principios de los años treinta, ha sido posible determinar un gran número de características de los diferentes núcleos, tanto estables como radiactivos.

¿Cómo prever la estabilidad de los núcleos? A partir de diversas consideraciones teóricas, basadas en las medidas experimentales de un cierto número de masas de átomos, se puede calcular la energía de enlace de los núcleos, y por tanto su masa, de la que se deduce la curva de energía de enlace por nucleón ya presentada en el capítulo 4 página 75. El principal factor es la interacción fuerte que asegura la cohesión de los nucleones en el núcleo. En un núcleo pesado, la mayor parte de los nucleones se encuentran totalmente rodeados por otros nucleones; para ellos, la interacción fuerte actúa de lleno (teniendo en cuenta sin embargo los números cuánticos respectivos). En cuanto a los nucleones que se encuentran en la superficie, sólo ven, si puede hablarse así, nucleones «por un solo lado». Para éstos la energía de interacción es menos importante: esto es lo que se denomina efecto de superficie. Otro factor es la energía coulombiana, es decir, la repulsión eléctrica que se ejerce entre los protones del núcleo y que compensa en cierto modo las fuerzas nucleares.

Por otra parte, el principio de exclusión de Pauli, que hemos recordado al referirnos a los electrones atómicos, se aplica también a los nucleones en el núcleo: dos nucleones de la misma naturaleza y de igual orientación de spin no pueden ocupar el mismo estado de movimiento. En un mismo estado de movimiento, por tanto, se

a

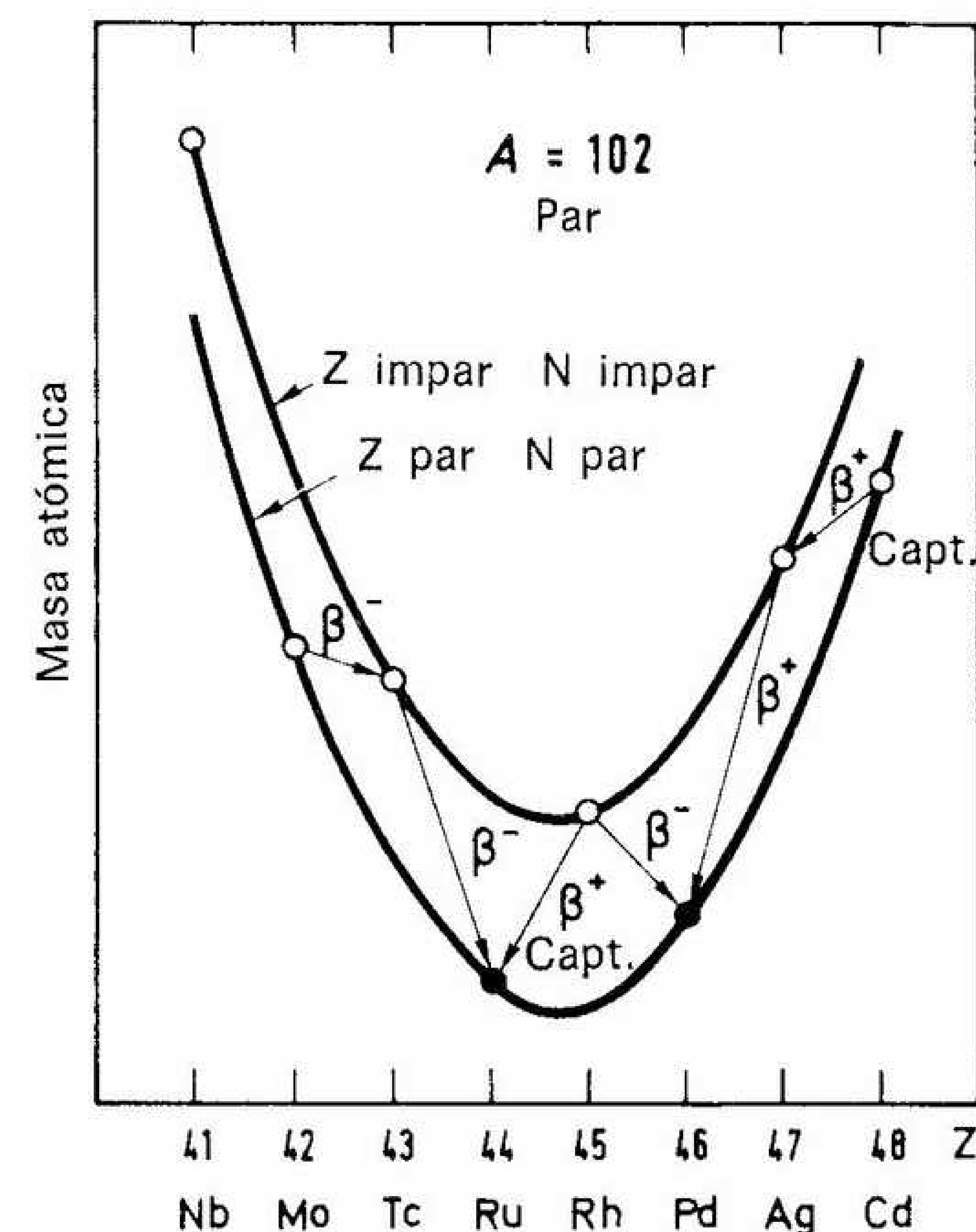


Parábolas de estabilidad; los núcleos radiactivos se desintegran sucesivamente, hasta llegar al (a los) núcleo(s) estable(s) del mismo número másico A:

pueden colocar como máximo cuatro nucleones: un neutrón con spin hacia arriba, un neutrón con spin hacia abajo, un protón con spin hacia arriba y otro protón con spin hacia abajo. En esta situación, los dos neutrones y los dos protones tienen entre ellos respectivamente, una interacción más fuerte que la de dos nucleones tomados no importa cómo. La energía de enlace de los cuatro nucleones que acabamos de describir es importante en particular. Aisladamente, cuatro nucleones emparejados de esta forma constituyen un núcleo de helio 4 que representa el primer pico de la curva de la energía de enlace.

Se desprende de todo esto una característica notable (von Weizsäcker, 1935): representemos en un mismo diagrama, en función del número atómico Z, la masa de un átomo para los núcleos del mismo número másico A; si A es impar (lo cual

b



a. Ejemplo de núcleo de A impar;
b. Ejemplo de núcleo de A par: la parábola se desdobla (parábolas de los núcleos par-par y de los núcleos impar-impar).

corresponde sea a un número de protones Z par y a un número de neutrones N impar, sea a la inversa), los núcleos se disponen más o menos en una parábola. El núcleo más bajo es el más estable (véase el ejemplo en la figura *a* adjunta). Los otros núcleos son radiactivos y la diferencia de masa entre dos núcleos próximos es la energía disponible para la transformación radiactiva β correspondiente, en la cual un protón se transforma en neutrón o viceversa.

Por el contrario, si A es par, vemos aparecer *dos* parábolas; la superior corresponde a valores de Z y N impares ambos, lo que implica unas energías de enlace más pequeñas y por tanto masas mayores; la parábola inferior corresponde a la situación más estable, con los valores de Z y N pares los dos. Una radiactividad β hace pasar alternativamente de una a otra parábola: para A par, se tendrá así, en general, dos núcleos estables separados por un

núcleo radiactico (véase la figura *b* adjunta). Se observa que, cuanto más nos alejamos de la parte inferior de la parábola, más aumentan, en promedio, las diferencias de energía de enlace entre núcleos sucesivos.

Si representamos en un mismo esquema el conjunto de todos los núcleos conocidos, tanto estables como radiactivos, esquema llamado a menudo diagrama de Segrè (figura adjunta), se observa que los núcleos estables se alinean más o menos alrededor de una línea regular, que, debido a la creciente repulsión coulombiana, se distancia poco a poco de la recta N = Z, que representa los núcleos que comprenden tantos protones como neutrones (como es el caso de los núcleos más ligeros hasta el $^{48}_{20}$Ca). Las parábolas de las que hemos hablado antes son unas secciones diagonales, para un valor de A constante, a través de ésta figura, donde la masa se representa perpendicularmente al dibujo, en la tercera dimensión. Vemos aparecer así lo que se denomina el «valle de estabilidad», cuyo fondo está ocupado por los núcleos estables, y en las laderas de este valle se encuentra el conjunto de núcleos radiactivos. Las laderas son cada vez más empinadas a medida que se alejan del fondo del valle.

A principios de 1937, había aún cuatro casillas vacías en la tabla de Mendeleiev. Las cuatro fueron llenadas por elementos que sólo tienen isótopos radiactivos. Dos de ellas están ocupadas, hoy por hoy, por elementos radiactivos artificiales. En 1937, E. Segrè, durante una estancia en Berkeley, consiguió que se le diera el talón[1] de molibdeno del deflector del ciclotrón, que había sufrido durante varios años el bombardeo de los deuterones. De ese molibdeno, Segrè consiguió separar, con C. Perrier, un isótopo radiactivo de período 2,6 millones de años, de un elemento nuevo de Z = 43, al que dio el nombre de tecnecio —del griego *tekhnetos* «artificial»— que no tiene ningún isótopo estable. En 1940, se obtuvo, en Berkeley, mediante bombardeo del bismuto con partículas α, el isótopo 211 de un nuevo elemento, el astatio (del griego *astatos* «inestable»), de número atómico 85, el más pesado de los halógenos; se le encontró después en la naturaleza, en algunas ramificaciones muy débiles de dos familias radiactivas. Por último,

[1] El deflector comprendía, en su cara interna, una pieza metálica que era atacada sin interrupción por una parte del haz incidente, llamada talón, y que resistía altas temperaturas.

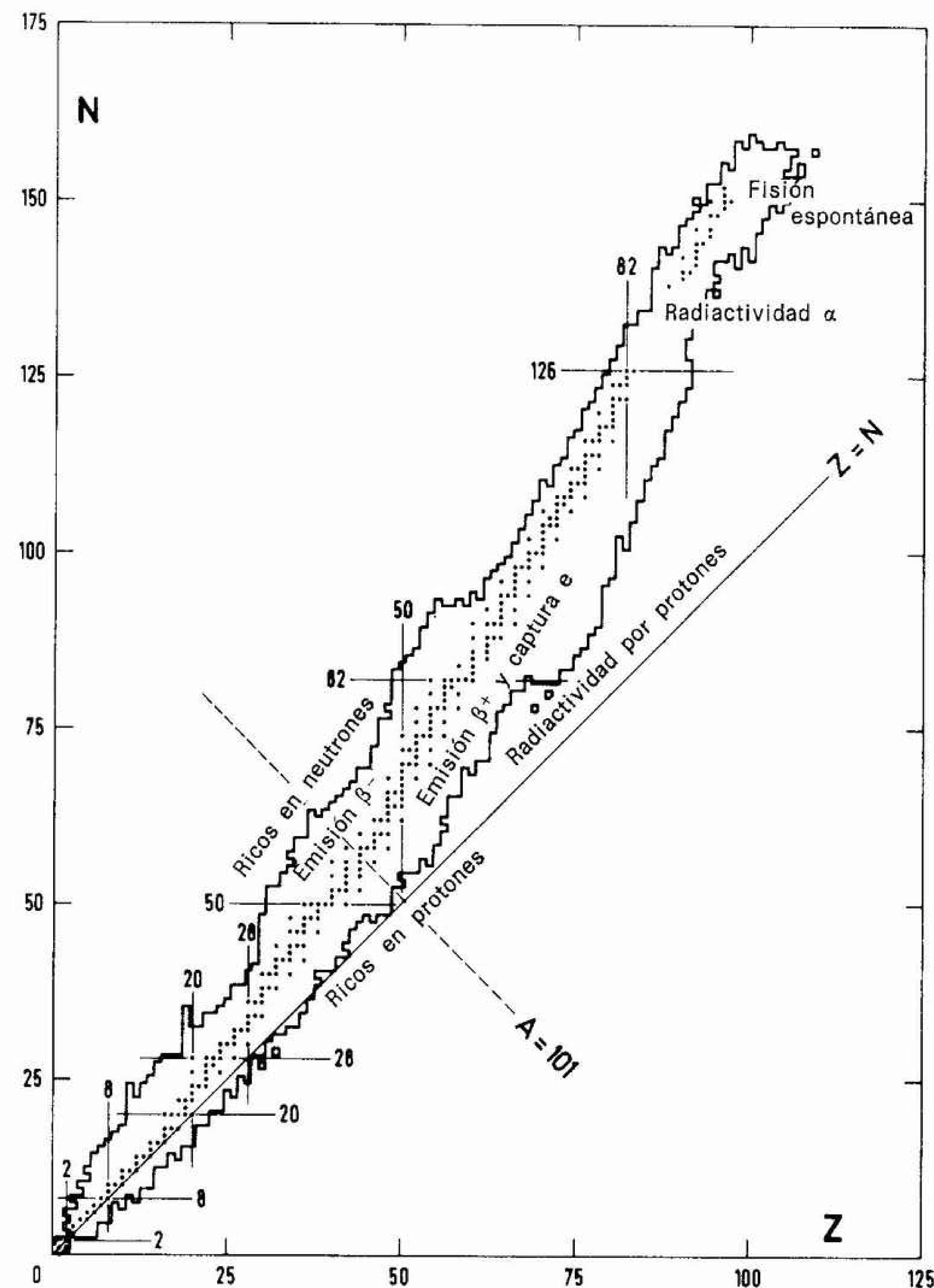


Diagrama N-Z (o de Segrè): conjunto de núcleos estables (puntos negros) y radiactivos (delimitados por el contorno en línea continua) conocidos en 1982, en función de su número atómico Z y de su número de neutrones N.

en 1947, se descubrió, en los productos de fisión, un isótopo radiactivo de un nuevo elemento de las tierras raras, el prometio, de Z = 61. La cuarta casilla, correspondiente al elemento número 87, fue ocupada por el francio, el más pesado de los alcalinos, descubierto por Marguerite Perey, en 1937, en una débil ramificación (Ac K) de una familia radiactiva natural.

Para que se dé una transformación radiactiva es necesario que el estado final esté más unido que el estado inicial, es decir, que la transformación sea energéticamente posible (véase capítulo 3, primer apartado, página 25); la energía correspondiente se libera en forma de radiactividad; es transportada principalmente por la partícula o por la radiación emitida. Hemos visto, a lo largo de los capítulos precedentes, que existen dos formas principales de radiactividad:

a) La radiactividad más general es la radiactividad β que actúa por interacción débil. Una forma particular de esta radiactividad, descubierta en 1937 por Álvarez en Berkeley, es la captura por el núcleo de un electrón de una capa atómica interna (por lo general de la capa K). Esta captura de electrón, que va acompañada por la emisión de un neutrino monoenergético, es equivalente a la emisión β^+: en ambos casos un protón del núcleo se transforma en neutrón; por ejemplo, el núcleo de ^{7}Be se transforma, por captura de un electrón, en $^7_3$Li, y el kriptón 79 en bromo 79. En ciertos casos, como el del ^{7}Be, puede haber captura, y entonces la emisión β^+ no es energéticamente posible[1].

b) La segunda forma de radiactividad corresponde a la emisión de partículas cargadas, por efecto túnel, a través de la barrera coulombiana de potencial del núcleo (véase capítulo 3, tercer apartado, página 36). La radiactividad α es el ejemplo más común.

En 1940, Flerov y Petrjak, en Leningrado, encontraron que un núcleo pesado como el uranio podía fisionarse espontáneamente a través de la barrera de potencial que se opone a la fisión, *sin* que fuera necesario aportarle energía. La fisión espontánea es una transformación radiactiva que aparece en los núcleos más pesados

[1] En la radiactividad β se requiere como mínimo suministrar la energía m.c.^{2} correspondiente a la masa en reposo del electrón emitido; en la captura de un electrón, el núcleo final gana esta misma cantidad de energía.

del diagrama N-Z, en especial los transuránicos[1]. Así, por ejemplo, el curio 250 decrece por fisión espontánea, con un período de unos 10.000 años.

Otro tipo de radiactividad de la misma categoría es la radiactividad por protones, buscada durante mucho tiempo pero que no fue comprobada hasta 1981, en el laboratorio de la Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), en Darmstadt: se descubrió allí un isótopo del lutecio, ^{151}Lu, que emite protones de 1,23 MeV, desintegrándose en iterbio 150, con un período de 85 milisegundos. Los protones sólo son retenidos algún tiempo en el núcleo inicial por la barrera coulombiana. Se ha descubierto después otro emisor de protones, el tulio 147.

En el diagrama N-Z vemos, a la izquierda de la línea de estabilidad, los isótopos ricos en neutrones, y hacia la derecha los isótopos ricos en protones. Los radioisótopos más alejados de la línea de estabilidad, o muy lejos en el caso de los transuránicos, se han denominado núcleos exóticos. Se conocen hoy alrededor de 1.600 radioisótopos artificiales. Sin duda, quedan todavía por descubrir algunos millares.

Se ha intentado explorar el valle de estabilidad en todos los sentidos, para descubrir todos los radioisótopos posibles hasta los más exóticos. Con este objetivo, se han utilizado gran número de reacciones nucleares diferentes: las reacciones clásicas de las que ya hemos hablado, reacciones por protones, neutrones, deuterones o radiación alfa (véase figura página 165); la reacción de fisión en diversos núcleos pesados, que produce núcleos ricos en neutrones. Se han obtenido también estos núcleos sometiendo, en un reactor, determinadas muestras a un flujo intenso, o prolongado, de neutrones lentos que pueden ser capturados sucesivamente. Se han producido también núcleos exóticos mediante protones o núcleos más pesados acelerados a una energía de varios GeV (miles de millones de electronvoltios), que conducen a reacciones de espalación (emisión de un gran número de partículas por el

[1] En el diagrama N-Z, se observa que los núcleos más pesados son inestables debido a la repulsión coulombiana que es cada vez más importante a medida que crece el número de protones. En las familias radiactivas, la serie de radiaciones α y β sucesivas permite volver a una situación más estable al llegarse a un número atómico menor y un número de neutrones más parecido al número de protones.

núcleo blanco), o de fragmentación. Por último, se ha recurrido a reacciones con iones pesados; el ion pesado que sirve de proyectil es, por definición, un núcleo más pesado que la partícula α (que puede ir hasta el uranio).

Entre las técnicas experimentales de identificación con mayor rendimiento utilizadas hasta hoy, cabe citar: la separación de los núcleos producidos por las reacciones con iones pesados, mediante un selector de velocidades para identificar los núcleos de retroceso (aparato SHIP[1] de Darmstadt), y la espectrometría de masas en serie (la identificación de las masas obtenidas tiene lugar prácticamente al mismo tiempo que la reacción nuclear que las produce). Esta última técnica ha sido desarrollada en particular por un grupo de Orsay que investigaba en el CERN en busca de núcleos exóticos alcalinos; ha sido posible con esta técnica, por ejemplo, evidenciar y estudiar núcleos de sodio hasta el $^{35}_{11}$Na.

De esta forma los científicos se van aproximando, por las laderas del valle de estabilidad y en sus prolongaciones hacia los números másicos mayores, a los límites mismos de existencia de los núcleos radiactivos; este límite se alcanza cuando el hipotético núcleo con A nucleones ya no tiene vida propia y se desintegra en el mismo instante en que se forma; ya no se puede hablar entonces de estado nuclear. Hacia la izquierda del diagrama, se alcanza este límite cuando la energía de enlace del último neutrón de un núcleo llega a ser nula; hacia la derecha, cuando los protones o la radiación alfa susceptibles de ser emitidos pueden pasar por encima de la barrera coulombiana. En la dirección de los números másicos A mayores, en la región de los transuránicos, se está limitado por la fisión instantánea: los períodos de fisión espontánea se hacen cada vez más cortos hasta que desaparece toda la barrera a la fisión, que es entonces instantánea.

En la búsqueda de los transuránicos, nos habíamos detenido en el curio. Para llegar más allá, el equipo de Berkeley, animado por G. T. Seaborg, decidió preparar, en un reactor nuclear de alta densidad de neutrones, americio y curio en cantidades suficientes —del orden del miligramo para el primero y del microgramo para el segundo— para poder fabricar, mediante reacción nuclear o mediante captura de neutrones, elementos de números atómicos aún

[1] Iniciales de «Separator for Heavy Ion Reaction Products» (separador de los productos de reacciones por iones pesados).

^{40}Ar	^{41}Ar	^{42}Ca	^{43}Sc α,p	^{44}Ti
^{39}Ar	^{40}K n,p	^{41}Ca d,p n,γ	^{42}Sc α,d	^{43}Ti α,n
^{38}Ar	^{39}K d,^{3}He	^{40}Ca	^{41}Sc d,n	^{42}Ti
n,α ^{37}Ar	d,α ^{38}K	d,t p,d n,2n ^{39}Ca	^{3}He,t p,n ^{40}Sc	^{41}Ti
^{36}Ar	p,α ^{37}K	^{38}Ca		

Algunas reacciones simples clásicas a partir de un mismo núcleo blanco (^{40}Ca). Las flechas señalan el núcleo final resultante. Los núcleos estables están indicados por recuadros en negrita.

más elevados. Fue descubierto así, en diciembre de 1949, mediante bombardeo de ^{241}Am con partículas α, el elemento 97, denominado berkelio. El bombardeo de un blanco de curio proporcionó, en febrero de 1950, el primer isótopo del elemento siguiente, Z = 98, denominado californio, y que fue identificado a partir de los 5.000 átomos que se habían producido en la reacción.

Los dos transuránicos siguientes, los elementos 99 y 100, que fueron denominados respectivamente einstenio y fermio, fueron descubiertos mediante el análisis de los residuos procedentes de la lluvia de sustancias radiactivas de una explosión termonuclear en el Pacífico, en noviembre de 1952. Estos elementos transuránicos se habían formado por la captura sucesiva, en un breve espacio de tiempo, de un gran número de neutrones por el uranio 238, seguido de una cadena de radiactividades β^-. La identificación del fermio 255 se realizó esta vez con sólo 200 átomos, gracias a la nueva técnica de las columnas de resina de intercambio iónico.

Para ir más lejos aún, se fabricó einstenio 253, mediante un flujo intenso de neutrones en diversos reactores nucleares, y la cantidad total —mínima— así preparada fue irradiada con partículas α del ciclotrón de Berkeley. Se separó del producto final obtenido la fracción que debía corresponder químicamente al elemento 101. La observación de sólo cinco acontecimientos de fisión espontánea aseguró la identificación de un isótopo del elemento 101, cuyo período es de alrededor de una hora, y que después fue denominado mendelevio. El elemento 102 dio lugar a un áspero debate. Un equipo de físicos suecos, norteamericanos y británicos anunció, en 1957, su descubrimiento. Sus experimentos fueron sin embargo puestos en cuestión por equipos de Berkeley, en Estados Unidos, y de Dubna, en la URSS, que, de manera independiente, consiguieron preparar isótopos del elemento 102 mediante reacciones en iones pesados. El elemento 102 suele denominarse hoy nobelio, del nombre del creador del premio Nobel, si bien esta denominación no ha sido aún admitida universalmente. Un isótopo del elemento 103, denominado lawrencio, en honor del inventor del ciclotrón, fue descubierto en la primavera de 1961, también en Berkeley, bombardeando 3 microgramos de californio con iones boro del acelerador de iones pesados de la Universidad de California.

La competición para la creación de los elementos siguientes se endureció de nuevo. Estos elementos fueron identificados, sea por su emisión α, sea por su fisión espontánea. No han recibido aún nombres admitidos por todo el mundo, y se han obtenido bajo la forma de isótopos de período muy corto, de algunos segundos o incluso de fracciones de segundo. Se han producido en Berkeley y en Dubna isótopos de los elementos 104, 105 y 106. Para subir más alto en el número atómico, los investigadores de Dubna, en lugar de irradiar blancos de transuránicos de la serie de los actínidos, bombardearon blancos de plomo o de bismuto con haces de iones pesados de argón. De esta manera, las reacciones de fusión entre el núcleo blanco y el núcleo proyectil permitieron obtener isótopos de masa atómica muy elevada.

En Darmstadt se produjeron isótopos del elemento 107, mediante lo que se ha denominado la reacción de fusión fría, en la que el núcleo final tiene una energía de excitación relativamente baja, lo cual es favorable para la producción de isótopos muy pesados. También en Dubna se obtuvieron isótopos del elemento 107. Por último, se obtuvo un isótopo del elemento 109, en 1892, mediante

RADIO Y FORMA DE LOS NÚCLEOS

Los científicos advirtieron muy pronto que la densidad de los núcleos —la densidad de la materia nuclear— era, en primera aproximación, constante, siendo el volumen proporcional al número A de nucleones. Por consiguiente, el radio de un núcleo es sensiblemente proporcional a la raíz cúbica de A, más exactamente:

$$R = r_0 A^{1/3}$$

con: $r = 1{,}2 \times 10^{-13}$ cm.
Esto da, para un núcleo de oro 197, un radio de $7 \cdot 10^{-13}$ cm.
La unidad 10^{-13} cm se denomina a menudo fermi; legalmente, se denomina femtómetro (1 fm $= 10^{-15}$ metros).
Se ha podido medir la forma de un gran número de núcleos en su estado fundamental. Algunos de ellos tienen, en efecto, la forma esférica, otros, como se verá en el capítulo 7, están deformados, parecidos a esferoides aplanados o alargados.

la irradiación de bismuto 209 con iones de hierro 58 en el acelerador lineal de iones pesados de Darmstadt. El elemento 109 se ha identificado sobre la base de un único acontecimiento, gracias al separador SHIP, correspondiente a la emisión inicial de una partícula α de 11,1 MeV ¡al cabo de 5 milisegundos! Se desearía, gracias a estas reacciones de fusión fría, llegar a sintetizar isótopos de elementos aún más pesados. La esperanza se funda en encontrar más arriba aún en la tabla de Mendeleiev, una zona de núcleos un poco más estables, y por tanto de períodos radiactivos algo mayores, a los que se ha denominado núcleos superpesados.

Todos los datos reunidos acerca de los estados fundamentales de los diferentes núcleos y de sus estados excitados, obtenidos tanto mediante el estudio de los isótopos radiactivos como por las investigaciones acerca de las reacciones nucleares, han servido para la elaboración de «modelos nucleares». Un modelo de este tipo trata de explicar el máximo número de hechos experimentales con el mínimo de hipótesis acerca de la estructura nuclear y la interacción entre nucleones en el núcleo.

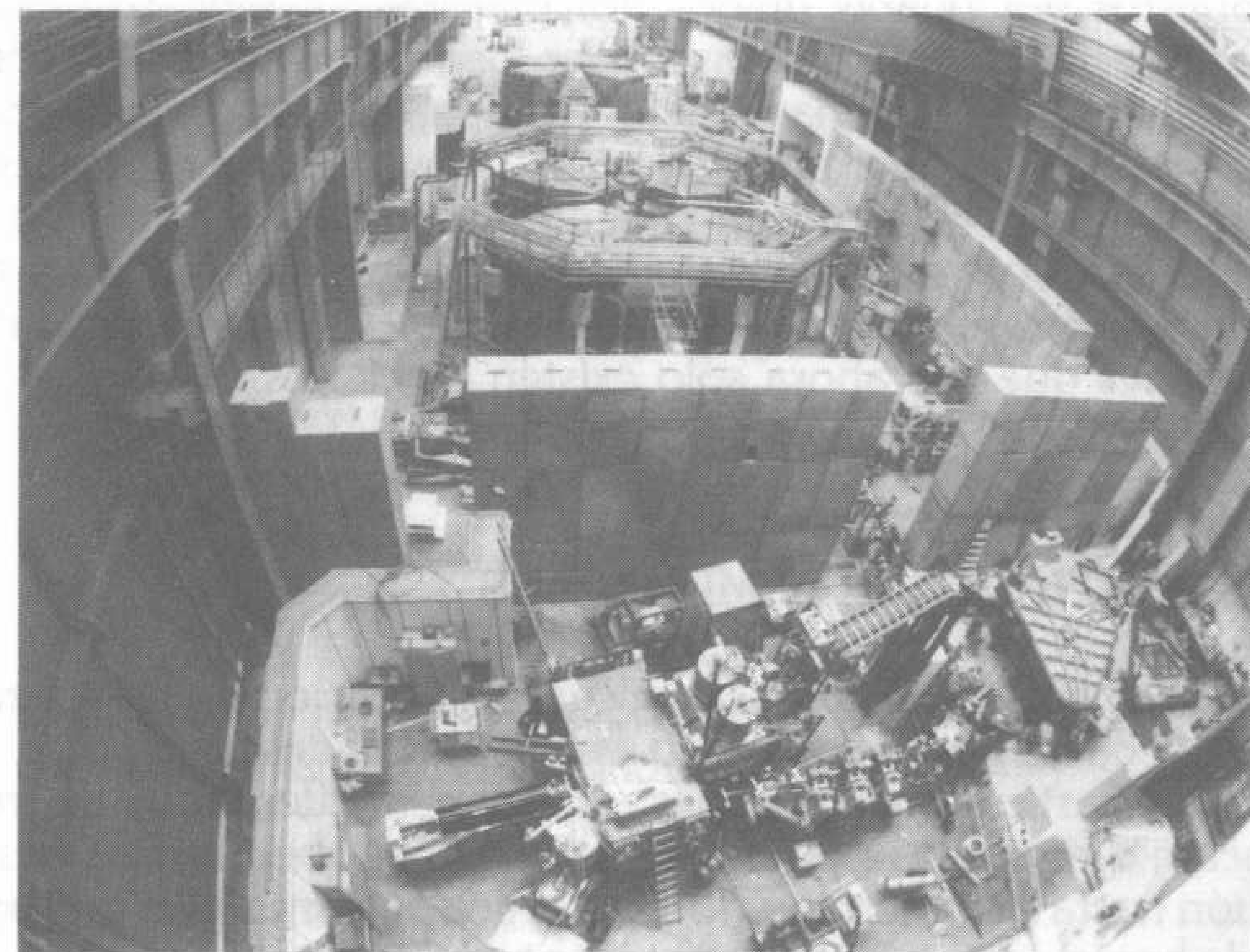
Hemos mencionado ya en el capítulo 6 el modelo de la gota líquida desarrollado por Niels Bohr. La acumulación experimental de las características nucleares ha mostrado las propiedades notables de los núcleos que comprenden 2, 8, 20, 28, 50, 82 ó 126

neutrones o protones; estos números se han denominado números mágicos. Tales núcleos son, en particular, más estables que los núcleos próximos y se les ve aparecer ya en la curva de la energía de enlace de la página 75. En 1949-1950, Maria Goeppert-Mayer y H. D. Jensen descubrieron, cada uno por su lado, que estos números mágicos podían explicarse por una configuración en capas de los nucleones en el núcleo, de modo parecido, ante la sorpresa general, a las capas electrónicas del átomo. Los nucleones se desplazan, en primera aproximación, por órbitas que corresponden a las diferentes capas. El asombro provenía de que, a diferencia del átomo, el núcleo no tiene centro de fuerza donde esté concentrada una masa especialmente grande. Sin embargo, todo ocurre como si ese centro existiera en el núcleo: el modelo en capas se basa, en efecto, en la acción de un potencial medio central al que los diferentes nucleones están sometidos. Es un resultado complejo de la acción de las fuerzas entre nucleones en el núcleo y del principio de exclusión de Pauli.

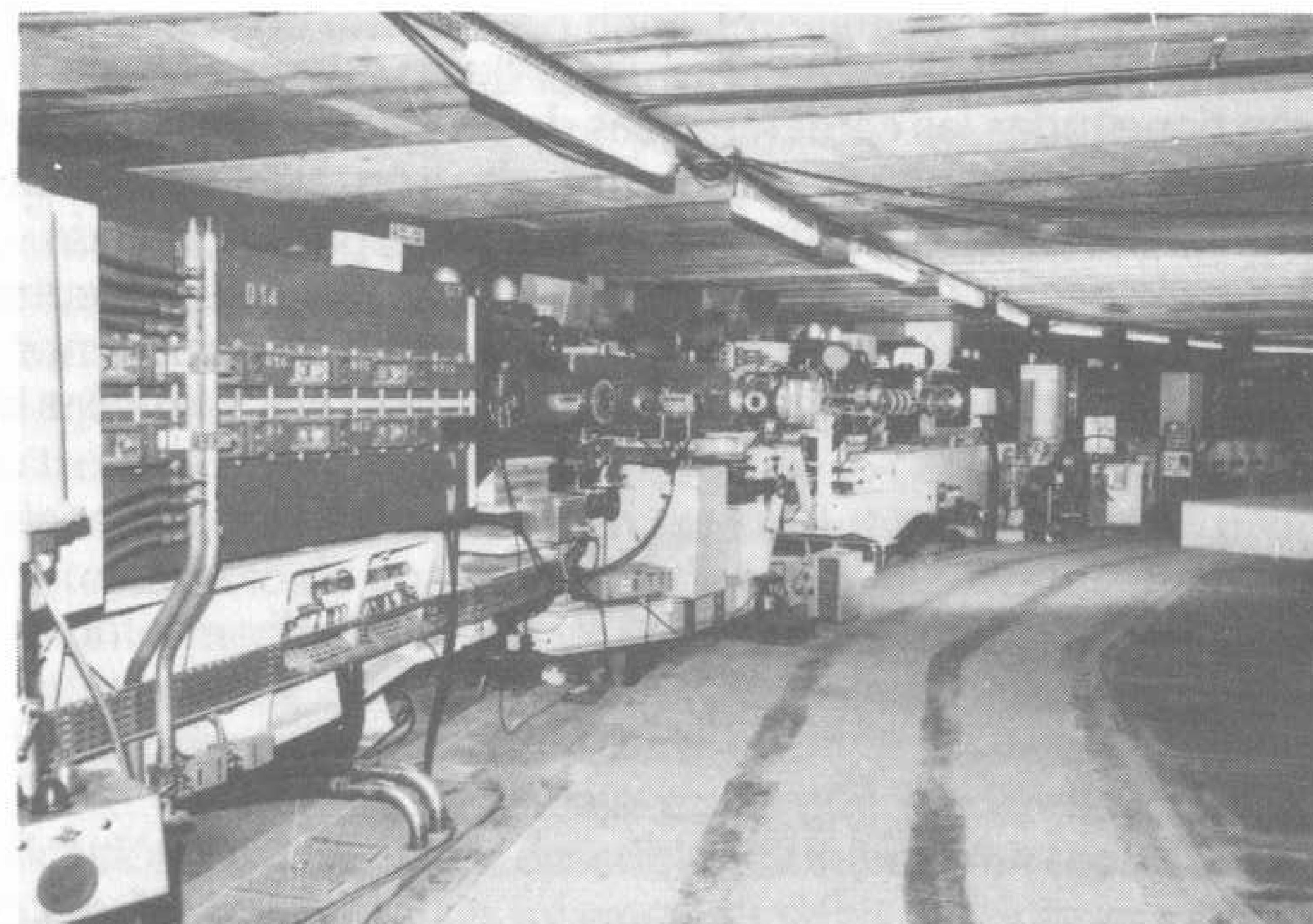
Los núcleos de números mágicos, y en especial los núcleos doblemente mágicos, como ${}^{4}_{2}He_{2}$, ${}^{16}_{8}O_{8}$, ${}^{40}_{20}Ca_{20}$, ${}^{208}_{82}Pb_{126}$, son particularmente estables, y su forma en su estado fundamental es esférica. Cada número mágico corresponde a una capa de protones o de neutrones completamente llena.

A. Bohr y B. Mottelson desarrollaron, a partir de 1952, el modelo colectivo, que es una especie de síntesis entre el modelo de la gota líquida y el modelo en capas del núcleo. El modelo colectivo describe movimientos de conjunto (rotaciones o vibraciones) de diversos nucleones del núcleo. El modelo prevé, de acuerdo con la experiencia, núcleos deformados, intermedios entre los núcleos esféricos que corresponden a los números mágicos. A. Bohr y B. Mottelson calcularon estas deformaciones. A partir del estudio de los núcleos exóticos, ha sido posible verificar la existencia de nuevas zonas de núcleos deformados prevista teóricamente. Los núcleos superpesados que antes hemos citado corresponderían —más allá de los transuránicos hoy conocidos— a los números mágicos 184 de neutrones y 114 a 126 de protones, que darían a los núcleos correspondientes una relativa estabilidad.

Prosigue en la actualidad el estudio de la estructura nuclear, gracias a los aceleradores de mayor rendimiento construidos estos últimos años, con el objetivo de comprender mejor la interacción entre nucleones en el interior del núcleo: intercambio de mesones, efectos de la subestructura de los propios nucleones, que estarían



Fotografía del acelerador nacional GANIL (Caen). Puede observarse los tres ciclotrones en cascada.



Vista parcial del acelerador nacional Saturne (Saclay). El acelerador —un sincrotrón— tiene forma de anillo.

compuestos por quarks unidos por gluones[1]. También se están haciendo esfuerzos para comprender los fenómenos colectivos y cooperativos de la materia nuclear excitada, en las colisiones entre iones pesados de diferentes energías: movimientos de rotación extremadamente rápidos, transferencia de materia nuclear de un núcleo a otro, formación de sistemas densos y excitados, explosiones de núcleos. Quizás encontraremos, en el laboratorio, unas condiciones que por ahora sólo existen en ciertas estrellas.

2. INTERACCIONES DÉBILES Y PARTÍCULAS ELEMENTALES

La radiactividad β no es la única manifestación de las interacciones débiles. Éstas gobiernan asimismo la desintegración de diferentes partículas elementales —inicialmente descubiertas en la radiación cósmica y después producidas en el laboratorio—, desde el muón hasta los hiperones (forma particular de nucleón excitado, de vida breve), pasando por los mesones π. De este modo, el muón (μ) se desintegra, por interacción débil, en un electrón acompañado de dos neutrinos:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

el muón tiene todas las características de un electrón pesado. Se ha descubierto, en los últimos años, un electrón aún más pesado denominado τ. Electrón, μ y τ se denominan leptones; a cada uno de ellos se le asocia un neutrino particular, ν_e —que es el neutrino ordinario—, ν_μ y ν_τ. Cada una de estas partículas debe tener su antipartícula ($\bar{\nu}$ es un antineutrino). Tendríamos así 3 familias con 4 leptones cada una:

$$e^- \; e^+ \; \nu_e \; \bar{\nu}_e$$

$$\mu^- \; \mu^+ \; \nu_\mu \; \bar{\nu}_\mu$$

$$\tau^- \; \tau^+ \; \nu_\tau \; \bar{\nu}_\tau$$

[1] Hoy se cree que el nucleón está formado por tres pequeñas partículas elementales, los «quarks», cuya carga eléctrica sería +2/3 y −1/3 de la carga elemental, ligadas entre sí por el intercambio de «gluones». El nucleón se parecería así, en cierto modo, a una grosella, con sus pepitas.

Los neutrinos asociados a los electrones se escriben a menudo así: ν y $\bar{\nu}$.

Además pueden existir desintegraciones como:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

y también:

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$$

Un hiperón Λ^0 se desintegra, por interacción débil, según:

$$\Lambda^0 \rightarrow + p \, \pi^-$$

o:

$$\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^+$$

Un haz de neutrinos puede provocar una radiactividad β inversa, como, por ejemplo, la reacción:



$$^{37}Cl + \nu_e \rightarrow {}^{37}Ar + e^-$$

que más adelante comentaremos.

En general entran también en juego otras fuerzas, como la interacción fuerte o la interacción electromagnética, que pueden enmascarar la interacción débil. Pero cuando se trata de neutrinos, sólo interviene la interacción débil. Por esta razón, los neutrinos se han utilizado para detectar la difusión provocada por la interacción débil. Ésta fue observada, por primera vez, en 1973, con un haz de ν_μ en una cámara de burbujas de líquido pesado, denominada Gargamelle, en el CERN de Ginebra. Era una prueba indirecta del intercambio de una partícula intermedia neutra en una interacción.

Se ha elaborado una teoría de las interacciones débiles por analogía con la interacción electromagnética. Es la unificación «electrodébil» desarrollada a lo largo de los años 1957-1978. Los teóricos han predicho también que la interacción débil procedía por intercambio de una partícula de masa importante denominada bosón intermediario, W^+, W^-, Z^0. Estas partículas pesadas se observaron, en efecto, en el CERN, mediante una colaboración internacional, a principios del año 1983.

En la actualidad, se trabaja en lo que se denomina la «Gran Unificación», que aspira a describir en una misma teoría la interacción electromagnética, la interacción débil y la interacción fuerte. En la interacción fuerte, se ha reemplazado el intercambio de mesones entre nucleones por el intercambio de gluones entre quarks, constituyentes últimos de los nucleones. Una teoría así

prevé una posibilidad de desintegración espontánea del protón, que podría tener entonces una vida media comprendida entre 10^{30} y 10^{32} años, que es un lapso de tiempo enorme. Están en curso, no obstante, una serie de experimentos en diferentes países para tratar de evidenciar esa vida media del protón, por ejemplo, en una galería perforada lateralmente al túnel del Fréjus, en los Alpes.

El neutrino debe tener una masa nula o muy pequeña (equivalente a unos cuantos electronvoltios). Se están desarrollando experimentos en la actualidad para intentar medirla. La masa del neutrino puede tener una gran importancia en astrofísica. Si no fuera nula, los neutrinos constituirían una parte importante de la masa del Universo.

3. APLICACIONES: LA ENERGÍA NUCLEAR

Queremos citar ahora brevemente cierto número de aplicaciones directas o indirectas de la radiactividad. Sólo comentaremos aquí algunos ejemplos. El lector encontrará informaciones más sustanciales en las publicaciones especializadas. Empezaremos por la energía nuclear, que, como se ha visto, no es más que una aplicación indirecta de la radiactividad, puesto que el descubrimiento de la fisión se realizó siguiendo los pasos de la radiactividad artificial.

Después de la divergencia de la primera pila atómica en Chicago, durante la guerra, se han construido en el mundo un gran número de reactores. En la actualidad, están en marcha en muchos países una serie de programas para obtener energía nuclear utilizable.

En 1983, la mitad de la electricidad consumida en Francia fue de origen nuclear.

El principio general de utilización es el siguiente: la fisión del material fisible produce energía, que es transportada —como hemos visto en el capítulo 6— por los fragmentos de fisión, los neutrones y otras radiaciones. La disipación de esta energía produce finalmente calor, que es evacuado del núcleo del reactor mediante un fluido susceptible de transportarlo (metal líquido, líquido o gas), y que circula por un circuito de refrigeración. Para evitar toda fuga de productos radiactivos, se emplea un intercambiador de calor y un circuito secundario, en el cual se produce vapor. Este vapor es conducido a una turbina que acciona un alternador, que

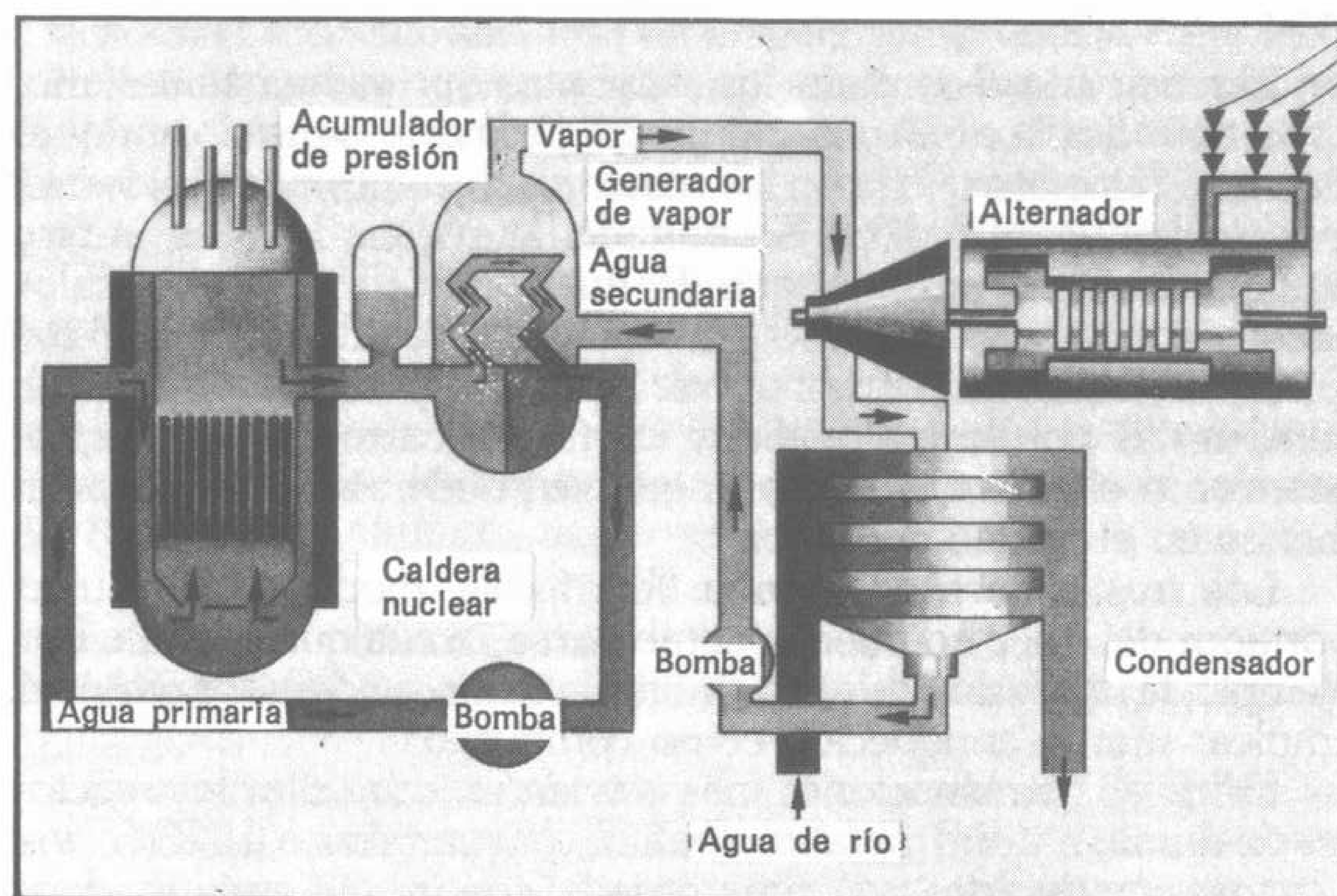
produce corriente eléctrica. El conjunto se denomina central nuclear.

El reactor en sí contiene los elementos que ya hemos descrito. El material fisible es, en general, uranio ordinario, o uranio enriquecido en ^{235}U, o bien ^{239}Pu en los reactores de neutrones rápidos. El moderador (véase capítulo 6, apartado 3.º, página 140), es grafito, agua ordinaria o agua pesada. El fluido que transporta el calor suele ser agua, gas carbónico, helio o sodio líquido. El control del funcionamiento del reactor se realiza mediante barras de control, compuestas por un material que captura eficazmente los neutrones, como el cadmio o el boro, que se pueden introducir más o menos en el núcleo del reactor.

Los tres elementos, combustible fisible, moderador y fluido portador del calor no pueden combinarse en cualquier forma. Por ejemplo, la utilización de agua ordinaria como moderador requiere emplear uranio enriquecido como combustible.

Entre las combinaciones más corrientes, cabe citar los reactores de uranio natural metálico, grafito y gas carbónico (UNGG); los reactores moderados con agua pesada, con uranio enriquecido o no (la primera pila atómica francesa, ZOE, que entró en divergencia en 1948, era de este tipo); los reactores de uranio enriquecido, con agua ordinaria como moderador. Esa agua, en este último caso, es empleada también como fluido portador del calor; puede estar a presión: se habla entonces de un PWR (*Pressurized Water Reactor,* reactor de agua a presión); puede también dejarse hervir el agua, y emplear directamente el vapor producido: se habla entonces de un BWR (*Boiling Water Reactor,* reactor de agua en ebullición). En Francia, se encuentran esencialmente reactores del tipo UNGG y del tipo PWR.

Se han desarrollado también reactores de neutrones rápidos. En este caso, se aprovecha la fisión del uranio 235 y del plutonio 239 por neutrones rápidos. No es preciso entonces moderador. Las secciones eficaces de fisión por neutrones rápidos son mucho más pequeñas que por neutrones lentos, pero puede emplearse entonces uranio natural o incluso empobrecido en ^{235}U, mezclado con una fuerte proporción de plutonio. El núcleo del reactor está envuelto por una cubierta de material «fértil», que es uranio empobrecido en ^{235}U. Los neutrones rápidos producen, en el uranio 238 del núcleo y de esta cubierta, ^{239}Pu, que puede, a su vez, utilizarse como combustible fisible. Este tipo de reactores puede producir más material fisible que el que consume. Se denomina entonces



Esquema de una central nuclear del tipo PWR (central de Paluel).

«regenerador». Desde hace una decena de años funciona, en Marcoule, una central nuclear experimental construida según este principio (Phénix) que produce 250 MW eléctricos. En la actualidad, está terminándose la construcción de una central más importante, del mismo tipo, de 1.200 MW de potencia, denominada Super-Phénix, situada en la orilla izquierda del Ródano. El fluido portador del calor de Phénix y de Super-Phénix es sodio líquido.

Los fragmentos de fisión son, en general, núcleos radiactivos que tardan un tiempo más o menos largo en transformarse en isótopos estables. Dado que no se ha encontrado aún el medio de utilizarlos, ni de destruirlos artificialmente, se les ha dado el nombre de residuos radiactivos. Se han empleado diferentes procedimientos para almacenar o eliminar estos residuos. Han de desarrollarse aún procedimientos adecuados en este campo, y al respecto tienen lugar numerosas discusiones.

La explosión de dos bombas atómicas en el Japón, a finales de la Segunda Guerra Mundial, en 1945, hizo que el mundo concienciara de manera dramática la potencia de la energía nuclear. Una

bomba atómica está compuesta por una cierta cantidad, superior a la masa crítica, de un isótopo fisible, como ^{235}U ó ^{239}Pu; para que tenga lugar la reacción en cadena divergente, que lleva a la explosión, sólo puede utilizarse la fisión debida a los neutrones rápidos; de otro modo, el material fisible volaría en pedazos antes de que una fracción importante de este material tuviera tiempo de fisionarse y liberar la energía de la explosión. Para rebasar al instante la masa crítica necesaria para la explosión, se proyectan rápidamente, una contra otra, unas masas de dimensiones subcríticas del radioelemento fisible, o bien, de manera más general, se hace pasar muy rápidamente una masa de material fisible de una configuración subcrítica a una configuración supercrítica.

Existe otro proceso distinto de la fisión para liberar una gran cantidad de energía mediante una reacción nuclear: es la fusión de dos núcleos ligeros. Vemos, en efecto, en la curva de energía de enlace, reproducida en la página 75, que se gana energía de enlace no sólo por medio de la fisión de un núcleo muy pesado sino también —y de una manera más importante aún— mediante la fusión de dos núcleos ligeros. Esta fusión de núcleos ligeros es la reacción que produce la energía para la luz y el calor que radian las estrellas, entre ellas nuestro Sol. Esta energía de fusión se denomina energía termonuclear.

Se han estudiado en particular cinco reacciones termonucleares, todas ellas con los núcleos más ligeros. Son reacciones exoenergéticas, es decir, reacciones que liberan más energía de la que consumen; incluso con proyectiles incidentes de velocidad prácticamente nula, producen energía, que aparece en forma de energía cinética de los núcleos formados en la reacción.


$$^{2}H + {}^{3}H \rightarrow {}^{4}He + n + 17{,}6 \text{ MeV} \quad (1)$$

$$^{2}H + {}^{2}H \rightarrow {}^{3}H + p + 4 \text{ MeV} \quad (2)$$

$$^{2}H + {}^{2}H \rightarrow {}^{3}He + n + 3{,}3 \text{ MeV} \quad (3)$$

$$^{6}Li + n \rightarrow {}^{4}He + {}^{3}H + 4{,}7 \text{ MeV} \quad (4)$$

$$^{6}Li + {}^{2}H \rightarrow {}^{4}He + {}^{4}He + 22{,}2 \text{ MeV} \quad (5)$$

Sin embargo, para que la reacción tenga lugar, es preciso que la energía entre los dos núcleos a fusionar sea suficiente para vencer la barrera coulombiana (véase capítulo 3, apartado 3.° página 36) que los separa. Por tanto, para provocar la reacción, hay que suministrar cierta energía mínima.

La primera utilización de estas reacciones fue la construcción

de bombas de «hidrógeno», donde la energía mínima necesaria para la fusión la proporciona una bomba atómica situada en el interior del dispositivo. Como se sabe, la energía de la explosión de una bomba de hidrógeno es mayor aún que la de una bomba atómica.

La utilización de esta energía termonuclear para usos civiles, es decir, para producir energía de una manera controlada, lenta y regular, es una empresa mucho más difícil, a la que se dedican numerosos físicos e ingenieros de diversos países. Para construir una central termonuclear hay que realizar, en suma, en un reducido espacio y en un tiempo limitado lo que la naturaleza efectúa en un volumen de las dimensiones del Sol, en miles de millones de años.

Deben satisfacerse dos condiciones: la primera es dar a los núcleos en interacción la energía mínima que es, para la reacción (1) indicada antes, del orden de 10 keV. Si consideramos que 1 keV corresponde aproximadamente a 12 millones de grados, vemos que es preciso calentar el sistema a una temperatura de unos 120 millones de grados. A esta temperatura las reacciones (2) y (3) tienen secciones eficaces unas diez veces menores; además, la energía liberada en la reacción (1) es mayor; alrededor del 1/270 de la masa total se transforma en energía. Por todo ello los esfuerzos de los técnicos se han centrado hasta ahora en la reacción (1). La segunda condición a satisfacer implica que la energía liberada sea, en total, superior a la energía aportada para hacer funcionar el dispositivo. Esto significa que una cierta cantidad de deuterio y de tritio debe mantenerse confinada, en un volumen restringido, durante un tiempo suficiente.

En la actualidad, se siguen dos direcciones para lograr la fusión termonuclear controlada. La primera, denominada método de confinamiento inercial, consiste en realizar pequeños granulados de deuterio-tritio y bombardearlos simultáneamente con diversos haces sea de fotones (láseres), sea de electrones, de protones, o de núcleos pesados. El segundo enfoque es el confinamiento magnético de un plasma deuterio-tritio: para ello, se construyen unos grandes aparatos, denominados «tokamaks»,[1] en los cuales un plasma caliente d + t se mantiene en el interior de un recinto (en el cual reina un ultra vacío) de forma toroidal (en forma de rosquilla),

[1] «Tokamak» procede del ruso. Es la yuxtaposición de tres sílabas, que corresponden al principio de las palabras rusas que significan corriente, cámara y campo magnético.

sin entrar en contacto con él, por la acción de un campo magnético apropiado; se hace circular una fuerte corriente eléctrica en el plasma. Se han construido o están en construcción algunos tokamaks con cierto rendimiento, en la URSS, en EE.UU., en Japón y en Europa Occidental. En Gran Bretaña, se construye el JET, que es un proyecto en común de diversos países de Europa. En Francia se está construyendo actualmente un nuevo tokamak denominado «tore-supra»[1]. Se espera que con estos aparatos sea posible aproximarse a la consecución de las dos condiciones indicadas más arriba. Una vez satisfechas estas dos condiciones, se podrá pensar en la construcción de una central prototipo para producir energía termonuclear utilizable, objetivo que sin duda se alcanzará hacia el año 2000 ó 2010.

4. APLICACIONES EN BIOLOGÍA Y EN MEDICINA

Debe destacarse la aportación de la radiactividad artificial al desarrollo de la biología. La biología molecular, en particular, no habría podido obtener buen número de sus espectaculares resultados sin la herramienta capital que constituyen los radioisótopos artificiales. Sólo daremos aquí algunos ejemplos.

Hemos visto, en el capítulo 6, cómo se obtuvieron los primeros núcleos radiactivos de interés biológico. Los isótopos radiactivos del fósforo, ^{32}P, del hidrógeno, ^{3}H, del azufre, ^{35}S, del carbono, ^{14}C, han sido particularmente utilizados, puesto que se trata de elementos químicos con los que están constituidos los organismos vivos. Más tarde, ha sido posible fabricar radioisótopos de todos los elementos químicos, que abarcan una amplísima gama de períodos de vida media. La etapa siguiente ha sido la síntesis de «moléculas marcadas», es decir, de moléculas interesantes para la bioquímica, en las cuales un átomo estable se reemplaza por uno de sus isótopos radiactivos. Las moléculas marcadas tendrán las mismas propiedades, intervendrán en las mismas reacciones químicas que las moléculas estables ordinarias correspondientes, mucho más numerosas; las seguirán por tanto a todas partes, y se podrá descubrir su camino y sus asociaciones en el organismo por medio

[1] «Supra» = super, ya que el campo magnético está producido por una bobina superconductora, a temperatura muy baja.

de la radiación que emiten. Estas moléculas pueden detectarse en concentraciones pequeñas en extremo.

De esta manera, ha sido posible observar que la construcción de las estructuras moleculares complejas resultaba de una sucesión de etapas, cada una de las cuales aportaba elementos de estructura simple; ha sido así posible identificar el origen de cada uno de los átomos de las moléculas complejas. Se ha constatado que los constituyentes celulares son, al mismo tiempo, destruidos y formados por vías diferentes.

La biología molecular ha revelado que el esquema director del metabolismo se encuentra contenido por entero en el patrimonio genético, es decir, en el ácido desoxirribonucleico (ADN). Este resultado se apoya, en particular, en experimentos que emplearon moléculas marcadas.

En una célebre experiencia, Hershey y Chase prepararon un bacteriófago, cuyas proteínas estaban marcadas con ^{35}S y cuyo ADN estaba marcado con ^{32}P, con el que infectaron bacterias sensibles. Sólo el ^{32}P penetraba en las bacterias, mientras que las proteínas, localizables por su azufre radiactivo, permanecían en el exterior; las informaciones necesarias para la multiplicación y la construcción de los constituyentes de los bacteriófagos están, por lo tanto, localizadas en su ADN y no en sus proteínas.

Se han empleado también moléculas marcadas para el estudio de los enzimas, de los metabolismos, de los mecanismos de regulación y del modo de acción de numerosos medicamentos.

Estas moléculas han permitido estudiar el código genético, la biosíntesis de las proteínas, y hoy aportan su ayuda a la ingeniería genética.

El uso de moléculas marcadas, en particular del ^{3}H, ha permitido la aplicación de la autorradiografía a escala celular, es decir, seguir visualmente las macromoléculas portadoras de núcleos radiactivos para determinar su avance y su localización en el interior de las células vivas.

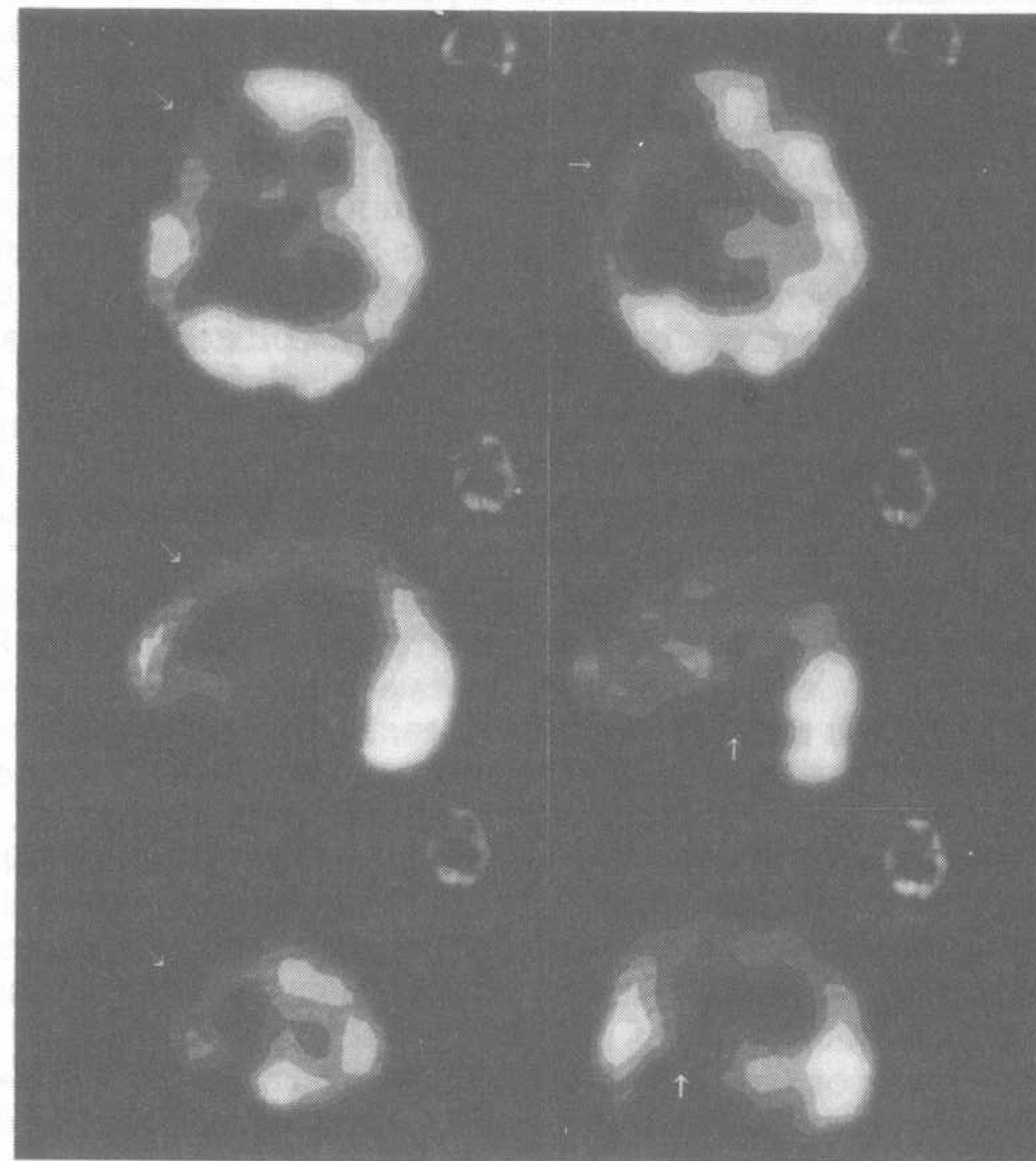
La síntesis de una hormona marcada se realizó por primera vez en 1944, por un equipo pluridisciplinario constituido por F. Joliot, R. Courrier, A. Horeau y P. Süe. Las hormonas marcadas han permitido, después, identificar los correspondientes receptores moleculares y, por ejemplo, analizar los aspectos moleculares de la acción farmacológica de ciertas sustancias.

La dosificación radioinmunológica (RIA) realizada con moléculas marcadas ha conocido un gran desarrollo en estos últimos

años. Su aplicación es habitual en los laboratorios médicos, en especial para la dosificación de hormonas.

Es posible evidenciar la distribución de un medicamento radiomarcado a escala de todo el cuerpo, de un órgano o de una célula, y estudiar sus modos de acción así como la farmacocinética.

Desde el punto de vista médico, los isótopos radiactivos se han



Tumor cerebral revelado por una tomografía γ (sucesión de «mapas» del cerebro, tomados a diferentes profundidades y según diferentes orientaciones). El tumor (indicado por las flechas) se localiza gracias a las radiaciones γ del yodo 123 contenido en la yodoanfetamina.

empleado como indicadores para el diagnóstico y como fuente de radiación intensa para la terapia.

Entre los ejemplos históricos de diagnósticos efectuados con este procedimiento, cabe señalar el empleo del yodo radiactivo para descubrir enfermedades en la glándula tiroides. Cabe citar también la exploración del esqueleto por escintilografía mediante compuestos fosforados marcados con tecnecio 99 para localizar metástasis óseas de cáncer, y el diagnóstico precoz de deficiencias en la vascularización del músculo cardíaco por lesión coronaria, con ayuda de indicadores como en el talio 201 ó el rubidio 82.

La circulación sanguínea y el metabolismo cerebral se han podido estudiar gracias a la radiación del yodo 123 radiactivo.

Entre los ejemplos de realizaciones recientes en este campo, cabe destacar un eficaz instrumento, la cámara de positrones que permite efectuar tomografías del cerebro. Se fabrica, con un ciclotrón, oxígeno 15, emisor de positrones de 2 minutos de período. Se hace inhalar oxígeno que contiene trazas de ^{15}O. Este gas pasa a la sangre, e irriga en particular el cerebro. Se coloca alrededor de la cabeza del paciente una corona de detectores. Los positrones de ^{15}O se aniquilarán al terminar su recorrido chocando con los electrones, dando dos radiaciones γ de 0,51 MeV emitidas en sentidos contrarios. Si dos detectores indican que reciben señal, esto quiere decir que el punto emisor de las dos radiaciones está situado en la recta que va de uno a otro. La diferencia entre los tiempos de llegada de las dos radiaciones permite localizar el punto emisor sobre esa recta. Es posible realizar así una cartografía, con ayuda de una calculadora, del caudal sanguíneo en el interior del cerebro.

Por lo que se refiere a la terapia, la radiación γ de fuentes intensas de ^{60}Co o las radiaciones de diferentes tipos suministradas por los aceleradores de partículas se emplean de modo corriente en el tratamiento de ciertos tipos de cáncer, en asociación con otras terapéuticas (quimioterapia, cirugía, ...).

Mencionemos también la utilización de trazadores radiactivos en biología vegetal y en agronomía (por ejemplo, en el estudio del metabolismo de los abonos fosfatados en las plantas). Se hace uso también de la radiación de los radioelementos o de haces de electrones acelerados para la conservación a largo término de ciertos alimentos, o la esterilización de materiales o instrumentos destinados a la medicina y a la cirugía.

5. HERRAMIENTAS PARA LA HISTORIA: LA DATACIÓN Y LAS DETERMINACIONES DE ORIGEN

La desintegración espontánea de los isótopos radiactivos de largo período y la comparación de su abundancia actual con isótopos de referencia permite determinar la edad, es decir, «datar» ciertos acontecimientos del pasado.

Estos acontecimientos pueden ser de orden geológico o astrofísico y hablaremos de ello un poco más adelante, o bien pueden ser acontecimientos concernientes a la historia de la humanidad y de éstos vamos a tratar en primer lugar aquí.

W. F. Libby ideó, en 1946, el método de datación mediante el radiocarbono: uno de los isótopos radiactivos del carbono es el carbono 14, emisor β^- de 5.730 años de período. Las edades de este orden de magnitud corresponden perfectamente a las épocas históricas antiguas. El ^{14}C se forma, en la atmósfera, de manera continua, por reacción nuclear provocada por los rayos cósmicos secundarios sobre el nitrógeno del aire. Se establece entonces un equilibrio entre su formación y su desintegración espontánea. Por lo tanto, la concentración de este radiocarbono ha sido sensiblemente constante en el espacio y en el tiempo. Los átomos de carbono radiactivo ^{14}C y de carbono natural ^{12}C se intercambian de forma regular, de manera que el gas carbónico que se encuentra de modo natural en la atmósfera contiene una proporción constante de ^{14}C. Todo ser vivo, hombre, animal o planta, absorbe gas carbónico, y encontramos así ^{14}C en toda la materia viviente. Cuando el ser vivo muere, el intercambio con la atmósfera cesa, y el ^{14}C, cuya concentración era constante hasta entonces, comienza a disminuir, sin que haya nuevos aportes de ^{14}C. Viene a ser un reloj, que se pone en marcha en el momento de la muerte del material vivo. La proporción de ^{14}C en el carbono del espécimen medido establece así su edad. Gracias a los métodos de medida muy sensibles de la radiación β^- emitida, ha sido posible remontarse hasta cerca de sesenta mil años atrás.

Este método ha sido aplicado, por ejemplo, al estudio de los restos de antiguas civilizaciones en el Valle del Nilo, desde el alto Egipto hasta el mar. Tales vestigios han sido descubiertos en el alto Egipto, correspondientes a fechas muy remotas (tres mil a dieciocho mil años a.C.); pero la antigua civilización egipcia, basada en el aporte periódico de aluviones fértiles por el desbordamiento anual del Nilo, no aparece, en el bajo Egipto, según las dataciones

con carbono 14, hasta principios del Imperio Antiguo, hacia el año 3000 a.C. Los especialistas se preguntan las razones de esa aparición tardía. Recientemente, Jacques Labeyrie, que databa resíduos de objetos orgánicos en las costas del Mediterráneo, del África Occidental y de las islas del Pacífico, descubrió que el nivel del mar era, antaño, mucho más bajo que hoy. Parece que alcanzó su nivel mínimo, unos 120 m por debajo del nivel actual, hacia 16000 a.C., antes de volver a subir poco a poco hasta 3 m por encima del nivel actual, hacia el año 3000 a.C.

El valle bajo del Nilo tenía así un lecho más profundo y una pendiente mucho más rápida que en la actualidad, lo que no permitía al depósito de aluviones, base esencial de una civilización agrícola. Esos depósitos de aluviones, que se extendían progresivamente cada año, sólo llegaron a ser importantes y utilizables, en el delta que se había formado y en el valle bajo del Nilo, a partir del momento en que el nivel del mar llegó a su máximo valor.

El ^{14}C no es el único núcleo radiactivo de largo período que permite medidas de datación. En geofísica, por ejemplo, se utilizan hoy núcleos radiactivos como ^{36}Cl de 300.000 años de período, o ^{10}Be de 1,6 millones de años de período. Se han establecido nuevas técnicas de identificación y detección para estas mediciones.

Cabe vincular a estas mediciones de edad las investigaciones del origen histórico o geográfico de ciertos objetos trabajados por el hombre. La materia de que están compuestos estos objetos contiene, en general, diversas impurezas con un bajo contenido de ciertos elementos químicos, que es posible identificar mediante los métodos de la radiactividad: se irradia una muestra, de manera no destructiva, mediante neutrones o partículas cargadas y se forman así en las impurezas tal o cual isótopo radiactivo, emisor de rayos γ. Unas mediciones muy precisas de la energía de esta radiación γ, mediante detectores de germanio, permite identificar, de una manera unívoca, las impurezas y por tanto el origen del material principal que constituye la muestra estudiada. La arcilla empleada en la antigüedad para fabricar cerámica o alfarería contiene trazas de impurezas que son específicas del lugar donde se ha extraído la arcilla. La obsidiana, con la que están hechas las flechas empleadas por los indios de diferentes regiones de América contiene también ciertos elementos en estado de trazas, específicos del origen geográfico de la obsidiana. La técnica es aplicable también a la composición del vidrio o a las monedas antiguas.

6. ANÁLISIS POR ACTIVACIÓN Y APLICACIONES INDUSTRIALES

El análisis por activación del que hemos hablado antes se emplea también en la industria, por ejemplo para medir las impurezas o las trazas de ciertos elementos en los metales y las aleaciones.

En las galgas radiactivas, la absorción de la radiación emitida por una fuente permite controlar el espesor de un cartón o de una hoja de papel, y, por consiguiente, regular automáticamente las máquinas de producción. Introduciendo un radioelemento en un producto, puede seguirse su desplazamiento, por ejemplo para detectar fugas en una canalización enterrada.

La gammagrafía, es decir, la utilización de fuentes que permiten radiografiar piezas metálicas de cierto espesor, a fin de descubrir defectos tales como fisuras, se emplea también en la industria.

La esterilización de ciertos objetos, como los instrumentos quirúrgicos, se realiza hoy sometiéndoles a radiaciones suficientemente intensas.

Todos estos trabajos se realizan bajo un estricto control de la radiación, de acuerdo con una legislación que ha sido perfeccionada a lo largo de los años, al objeto de respetar las dosis de tolerancia admisibles, definidas para los operarios y para el público en general.

En ciertas condiciones, los rayos γ o los electrones provocan la polimerización de ciertas sustancias, y esta propiedad se emplea para la conservación de obras de arte.

Señalemos por último las aplicaciones en ciertos peritajes judiciales: el análisis por activación ha permitido, por ejemplo, calcular la cantidad de arsénico contenida en los cabellos, que retienen de forma especial este elemento.

7. ALGUNAS CLAVES DEL ORIGEN Y LA EVOLUCIÓN DEL UNIVERSO

La astrofísica nuclear es una ciencia relativamente reciente, que se ha desarrollado gracias, por una parte, al progreso de la física nuclear, así como de la física de las partículas elementales, y, por otra parte, gracias al desarrollo espectacular de los dispositivos de medida, que ya no están limitados a la observación desde el suelo,

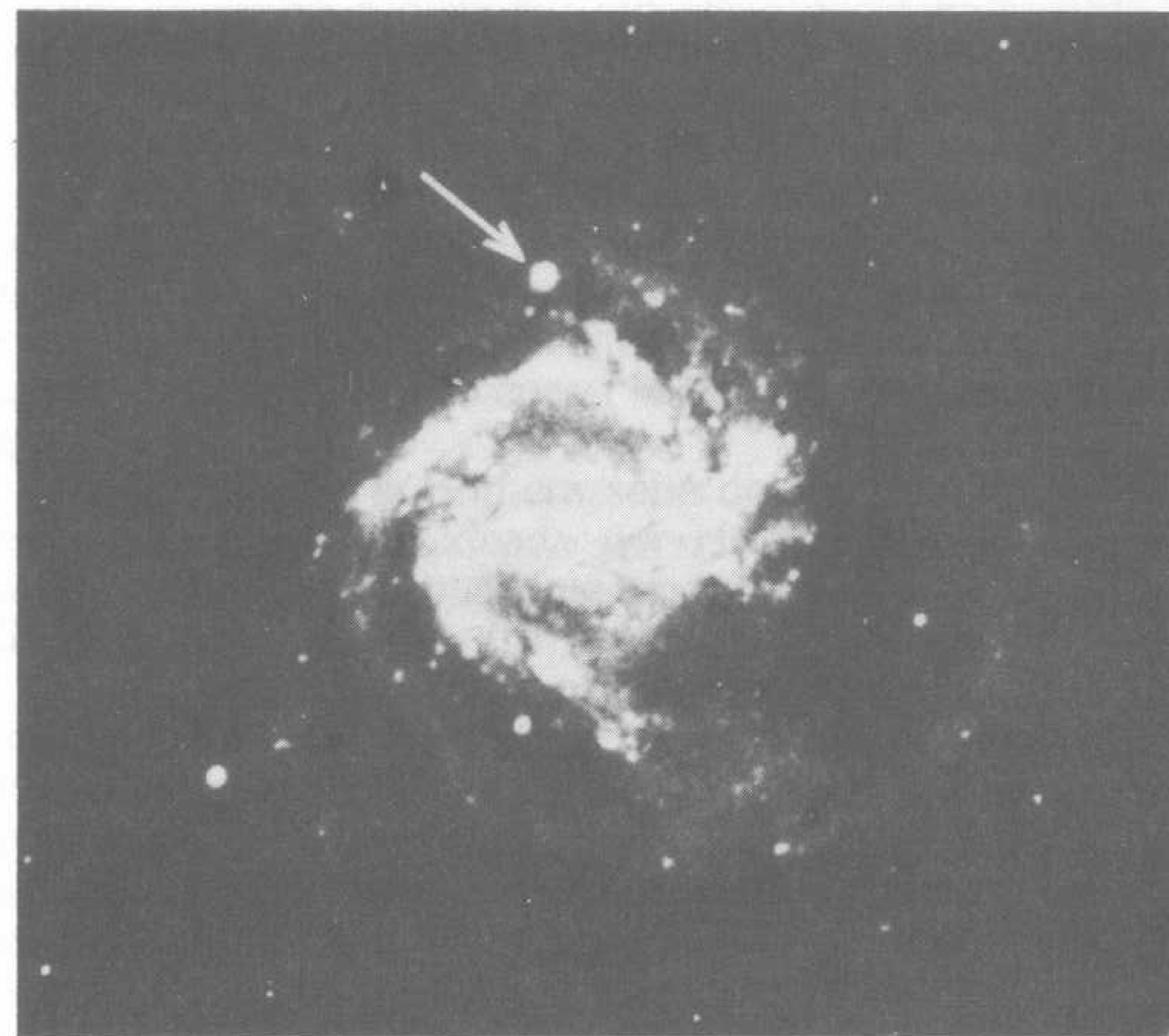
sino que se han extendido a los estudios desde satélites y con sondas espaciales.

Cuando se habla de radiactividad en astrofísica, la distinción entre radioelementos naturales y artificiales deja de tener objeto. Entrar en consideración todos los radioisótopos, en función sólo de la rapidez o de las condiciones particulares de los procesos que los originan.

Tomemos el ejemplo del berilio 7, que se desintegra normalmente en ^{7}Li, por captura K, con un período de 53 días. Se encuentra ^{7}Be en la radiación cósmica; resulta de reacciones de espalación por los protones o los rayos α de la radiación cósmica primaria en el nitrógeno y el oxígeno de ciertas estrellas o del gas interestelar. Debido a la velocidad que adquiere, al circular pierde sus cuatro electrones y no puede experimentar la captura de electrones. Se convierte así en un núcleo estable cuando atraviesa el espacio interestelar y llega a la atmósfera terrestre.

Entre los cuerpos celestes más destacables están las supernovas cuya explosión súbita es a veces visible incluso en pleno día. Una de las más célebres es la que fue observada por los astrónomos chinos en el año 1054, y cuyos restos se encuentran en la nebulosa del Cangrejo. La luz emitida por estas supernovas varía extremadamente de forma muy rápida, y se atribuye una parte de esta variación a la formación y desintegración de ciertos isótopos radiactivos de período muy corto a la escala del Universo, como por ejemplo el níquel 56 de 6 días de período y su descendiente el cobalto 56 de 79 días de período. Prosiguen las observaciones de esos fenómenos.

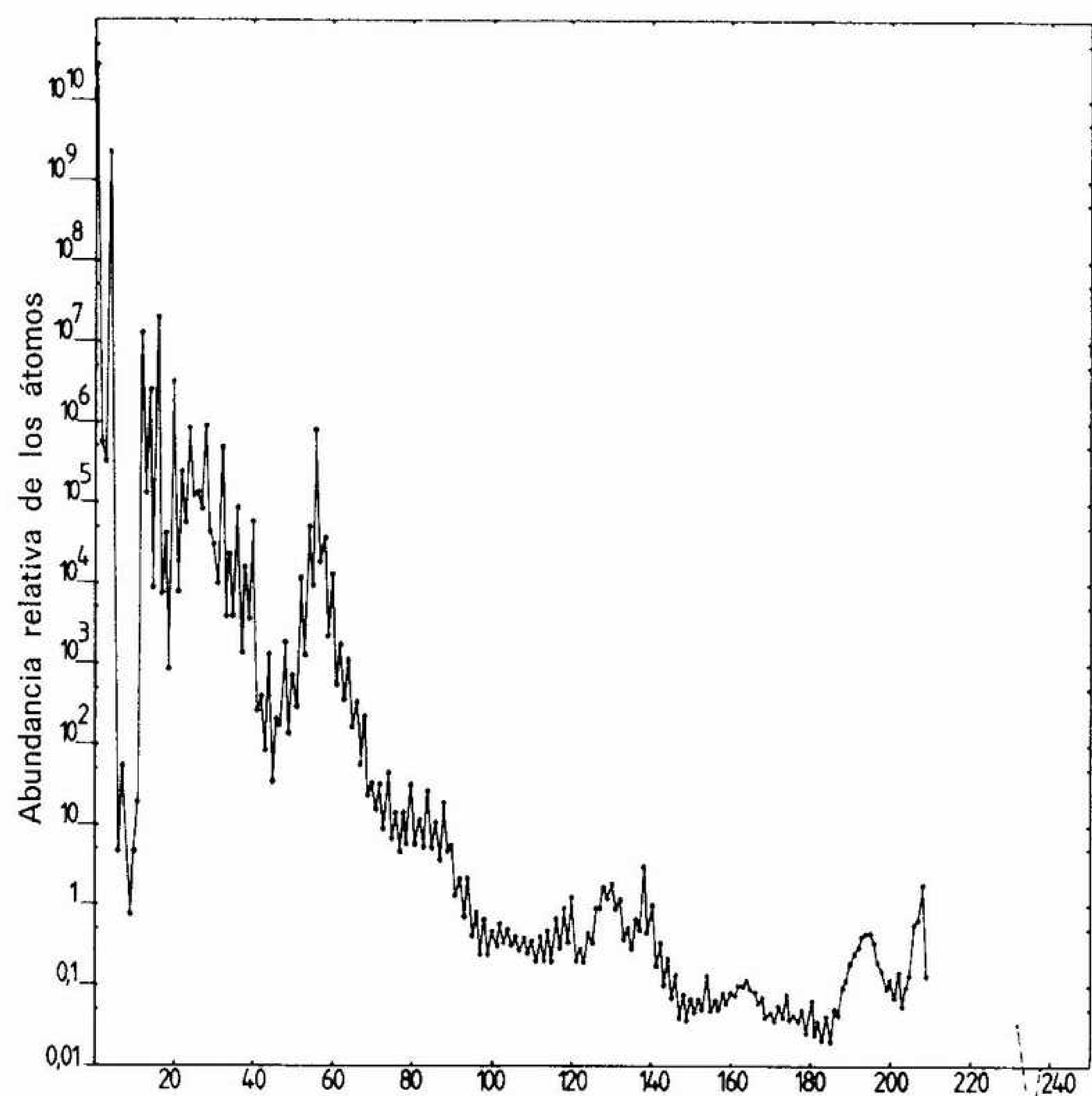
Ha sido posible determinar la abundancia relativa de los diferentes elementos químicos en la naturaleza, en la Tierra, en los meteoritos y en objetos celestes más lejanos. En la figura adjunta, se reproduce una curva que indica, en escala logarítmica, la abundancia relativa de los elementos en el Sistema Solar en función de su número másico. Se observará que los elementos ligeros, en particular H y He (alrededor del 98 % de la masa total de materia observada), son los más abundantes, con algunas excepciones notables (litio, berilio, boro). Los núcleos con números mágicos son más abundantes que sus vecinos. En la región del hierro, donde se hallan los núcleos más estables, encontramos un amplio pico. Los elementos pesados, por encima de la masa 100, aparecen, por término medio, en proporción más o menos constante, presentando picos y valles a los que ha sido posible encontrar explicación.



Supernova SN1961 en la galaxia espiral N G C 4303(M61), constelación de la Virgen. Cliché obtenido por el observatorio Lick, Santa Cruz, California.

La medición precisa del contenido de las rocas terrestres y de los meteoritos en rubidio 87, de $5 \cdot 10^{10}$ años de período, y del contenido en estroncio 87, que resulta de su desintegración, comparados con el contenido en estroncio 86, permite remontarse a la época de la formación del Sistema Solar, por coalescencia a partir de la nebulosa primitiva. El problema es determinar el tiempo transcurrido desde que estas rocas se diferenciaron y se solidificaron, para llegar a su composición actual. El método preciso del rubidio/estroncio nos da el valor de $4{,}55 \cdot 10^{9}$ años para la edad de la formación de nuestro Sistema Solar con sus planetas y meteoritos.

Los núcleos de masa superior al plomo o al bismuto no se han podido formar a través de un proceso lento de absorción de neutrones uno a uno, sino por la absorción rápida de varios neutrones a la vez en el transcurso de un intervalo de tiempo



Abundancia relativa de los elementos en el Sistema Solar (en escala logarítmica), en función de su número másico (número de átomos por 10^6 átomos de Si) [según E. Anders y M. Ebihara, 1982].

relativamente corto, seguido todo de cierto número de desintegraciones β^-. La relación actual de las abundancias naturales de los dos isótopos ^{238}U y ^{235}U, así como las abundancias relativas de los distintos isótopos estables del plomo, puntos de llegada de las familias radiactivas correspondientes, nos da una idea de la época de su formación y nos informa así acerca del período que precedió a la formación del Sistema Solar; en efecto, el isótopo menos abundante ^{235}U (0,7 %), del cual desciende la familia del actinio, tiene un período más corto ($7 \cdot 10^8$ años) que el isótopo más abundante ^{238}U, de período netamente más largo ($4{,}5 \cdot 10^9$ años).

La evolución de las estrellas, y más particularmente la de nuestro Sol, ha sido objeto de numerosos trabajos. Se ha intentado comprender el origen de la enorme energía irradiada sin interrupción por el Sol. El Sol quema continuamente, por reacciones de fusión nuclear, la materia de la que está formado. Han sido propuestas dos series de reacciones para explicar esta considerable liberación de energía; ambas series llevan a combinar cuatro protones para formar una partícula α, esto es, a sintetizar helio a partir de hidrógeno, con producción de energía. La alta temperatura del Sol permite que los núcleos venzan la barrera coulombiana que los separa.

Históricamente, la primera serie de reacciones, denominada ciclo del carbono, fue ideada por H. A. Bethe. El carbono es necesario en este ciclo para que tengan lugar las reacciones, pero sólo sirve de catalizador.

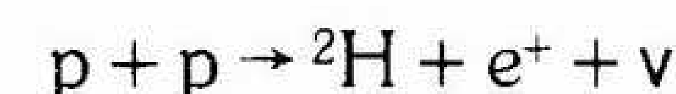
La segunda serie de reacciones se denomina ciclo protón-protón. Comprende unas reacciones nucleares de fusión que liberan mucha energía, así como desintegraciones β y capturas de electrones. Éstas proceden por interacción débil, pero en una escala temporal muy grande. Por tanto, en estas reacciones y desintegraciones por interacción débil, deben ser emitidos grandes caudales de neutrinos. Son lo suficiente penetrantes para llegar hasta nosotros. Su detección y la medida de su intensidad en la Tierra constituirían una prueba de la exactitud de las hipótesis emitidas. R. Davis, de Brookhaven, ha realizado un experimento que comprendía unos enormes detectores de neutrinos solares, y se basaba en la observación de la reacción:



$$^{37}Cl + \nu \rightarrow {}^{37}A + e^-$$

El número de neutrinos observados es sin embargo de tres a cuatro veces más pequeño que el esperado. Se han propuesto muchas explicaciones para este desacuerdo. Los neutrinos que pueden observarse con el detector de Davis deben ser bastante enérgicos, y sólo corresponden a una rama relativamente débil (básicamente $^8B \rightarrow {}^8Be^* + e^+ + \nu$) de la serie de reacciones del ciclo protón-protón.

Se ha proyectado un nuevo experimento que permitirá detectar los neutrinos de energía más débil de la reacción principal de la cadena:



$$p + p \rightarrow {}^2H + e^+ + \nu$$

La región interna del Sol de la que proceden los neutrinos de esta reacción es sensiblemente la misma que la que produce su luminosidad. Los resultados de este nuevo experimento nos permitirán comprender mejor el origen de la energía solar.

*

El lector habrá observado, en varias ocasiones, a lo largo de este relato, que sabios muy destacados han pasado rozando descubrimientos importantes sin verlos. Vamos a terminar con el comentario que hizo, referente a esto, F. Joliot, en ocasión de una clase en el Collège de France, en 1946:

«Necesitamos no sólo comprender cómo se ha realizado un descubrimiento, sino también por qué un descubrimiento que hoy nos parece familiar o sencillo no se había hecho más pronto. Este esfuerzo nos demuestra que, a pesar del aumento constante de nuestros conocimientos, nos encontramos en una situación parecida a la de nuestros predecesores, todavía ciegos ante una multitud de fenómenos desconocidos. Este tipo de conocimiento hace que abramos más los ojos a la naturaleza para descubrirla, nos da la audacia reflexiva que borra el conformismo.»

ANEXOS

1. NOTAS DE IRÈNE CURIE Y DE FRÉDÉRIC JOLIOT.
presentadas por Jean Perrin el 15 y el 29 de enero de 1934 en la Academia de Ciencias.

1. *Física nuclear.* Un nuevo tipo de radiactividad[1]

Hemos demostrado recientemente por el método de Wilson[2] que ciertos elementos ligeros (berilio, boro, aluminio) emiten electrones positivos cuando se les bombardea con rayos α del polonio. Según nuestra interpretación, la emisión de los electrones positivos de Be se debería a la *materialización interna* de la radiación γ, mientras que los electrones positivos emitidos por B y Al serían *electrones de transmutación* que acompañan la emisión de neutrones.

Al tratar de precisar el mecanismo de estas emisiones hemos descubierto el siguiente fenómeno:

La emisión de los electrones positivos por ciertos elementos ligeros irradiados por los rayos α del polonio subsiste durante tiempos más o menos largos, que pueden llegar a más de media hora en el caso del boro, una vez retirada la fuente de rayos α.

Colocamos una hoja de aluminio a 1 mm de una fuente de polonio. Después de irradiar el aluminio durante unos 10 minutos, lo situamos encima de un contador de Geiger-Müller con un orificio

[1] Sesión del 15 de enero de 1934.
[2] *Comptes Rendus, 196,* 1933, p. 1885; *J. de Phys. et Rad., 4,* 1933, p. 494.

cerrado por una pantalla de 7/100 de milímetro de aluminio. Observamos que la hoja emite una radiación cuya intensidad decrece exponencialmente en función del tiempo con un período de 3 minutos 15 segundos. Se obtiene un resultado análogo con el boro y el magnesio, pero los períodos de decrecimiento son *diferentes*, 14 minutos para el boro y 2 minutos 30 segundos para el magnesio.

La intensidad de la radiación (inmediatamente después de la exposición a los rayos α) aumenta con el tiempo de irradiación hasta un valor límite. Se tienen entonces intensidades iniciales del mismo orden de magnitud para B, Mg, Al, de alrededor de 150 impulsos por minuto en el contador utilizando una fuente de polonio de 60 milicuries.

Con los elementos H, Li, C, Be, N, O, F, Na, Ca, Ni, Ag no se ha observado ningún efecto[1]. Para algunos de estos elementos, el fenómeno probablemente no se produce, para otros el período de decrecimiento es quizás demasiado corto.

Los experimentos realizados mediante el método de Wilson o mediante el método de la trocoide, introducido por Thibaud, han mostrado que la radiación emitida por el boro y por el aluminio está constituída por electrones positivos. Es probable que ocurra lo mismo con la radiación del magnesio.

Al introducir pantallas de cobre entre el contador y la hoja irradiada, se encuentra que la mayor parte de la radiación es absorbida en 0,88 g/cm² en el caso del aluminio, 0,26 g/cm² para B y Mg, lo cual corresponde, si se admiten las mismas leyes de absorción que para los electrones negativos, a una energía de $2{,}2 \times 10^6$ *eV* para Al y $0{,}7 \times 10^6$ *eV* para B y Mg.

Cuando se reduce la energía de la radiación α que irradia el aluminio, el número de electrones positivos disminuye, pero el período de decrecimiento no parece modificarse. Cuando la energía de los rayos α se reduce en 10^6 *eV*, casi no se observa emisión de estos electrones.

Estos experimentos muestran la existencia de un nuevo tipo de radiactividad con emisión de electrones positivos. Creemos que el proceso de emisión sería el siguiente, en el caso del aluminio:



$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} = ^{30}_{15}\mathrm{P} + ^{1}_{0}n.$$

[1] Este fenómeno no puede, pues, deberse a una contaminación por la fuente de polonio.

des rayons α est réduit de 10⁶ eV on n'observe ~~pratiquement~~ presque plus de ces électrons.

Ces expériences montrent ~~que~~ l'existence d'un nouveau type de radioactivité avec émission d'électrons positifs. ~~Que nous~~ Nous pensons que le processus d'émission serait le suivant pour l'aluminium

$$^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}He = ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n$$

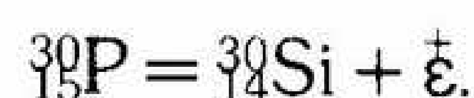
L'isotope $^{30}_{15}P$ du phosphore serait radioactif avec une période de décroissance de 3'15" et émettrait ... électrons positifs suivant la réaction

$$^{30}_{15}P = ^{30}_{14}Si + \overset{+}{\varepsilon}$$

Une réaction analogue pourrait être envisagée pour le bore et le magnésium les noyaux instables étant $^{13}_{7}N$ et $^{27}_{14}Si$. ... [illegible]

Página del borrador del manuscrito de la Nota a las Actas del 15 de enero de 1934, con las caligrafías de Irène Joliot-Curie (arriba) y Frédéric Joliot (abajo).

El isótopo ${}^{30}_{15}P$ del fósforo sería radiactivo, con un período de 3 minutos 15 segundos, y emitiría electrones positivos según la reacción:



$$ {}^{30}_{15}P = {}^{30}_{14}Si + \overset{+}{\varepsilon}. $$

Podrían preverse reacciones similares para el boro y el magnesio, cuyos núcleos inestables serían ${}^{13}_{7}N$ y ${}^{27}_{14}Si$. Los isótopos ${}^{13}_{7}N$, ${}^{27}_{14}Si$ y ${}^{30}_{15}P$ sólo pueden existir durante tiempos muy cortos, y por ello no se observan en la naturaleza.

Consideramos poco verosímil la explicación según la cual:



$$ {}^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}He = {}^{30}_{14}Si + {}^{1}_{1}H, $$



$$ {}^{30}_{14}Si = {}^{30}_{14}Si + \overset{+}{\varepsilon} + \overset{-}{\varepsilon}, $$

dado que el isótopo ${}^{30}_{14}Si$ estaría excitado y podría desactivarse a lo largo del tiempo, la energía se materializaría y daría un par de electrones. No se observa emisión de electrones negativos y es teóricamente muy improbable que la diferencia de energía entre los electrones sea suficiente para que los negativos no se observen[1]. Por otra parte este proceso supondría una duración del estado excitado extraordinariamente larga con un coeficiente de materialización interna unidad.

En definitiva, por vez primera ha sido posible, con la ayuda de una causa exterior, crear la radiactividad en ciertos núcleos atómicos y que subsista un tiempo medible en ausencia de la causa excitadora.

Otras radiactividades duraderas, análogas a las que hemos observado, pueden sin duda existir en el caso de bombardeo por medio de otras partículas. Un mismo átomo radiactivo podría sin duda ser creado mediante diversas reacciones nucleares. Por ejemplo, el núcleo ${}^{13}_{7}N$ que según nuestra hipótesis es radiactivo, podría ser obtenido por la acción de un deutrón sobre el carbono, con emisión de un neutrón.

---

[1] Nedelsky y Oppenheimer, *Phys. Rev., 44,* 1933, p. 948.

2. *Radiactividad.* Separación química de los nuevos radioelementos emisores de electrones positivos[1]

En una nota precedente[2] hemos mostrado que si se irradian ciertos elementos ligeros, B, Al, Mg, por la radiación α del polonio, la materia irradiada conserva una radiactividad relativamente duradera después de retirar la fuente de rayos α, radiactividad que se manifiesta por la emisión de electrones positivos. Se crean pues radioelementos nuevos, que pueden ser o bien isótopos inestables de elementos conocidos, o bien núcleos conocidos formados en un estado de excitación particular. La primera hipótesis, que es la más verosímil, lleva a considerar que los núcleos ${}^{13}_{7}N$, ${}^{27}_{14}Si$, ${}^{30}_{15}P$ son radiactivos con emisión de positrones.

Los períodos de decrecimiento de estos átomos son respectivamente de 14 minutos, 2 minutos 30 segundos, y 3 minutos 30 segundos, duraciones suficientemente largas para acometer su separación química de la materia irradiada.

Empleando una fuente de alrededor de 100 milicuries de Po el número de átomos radiactivos que pueden obtenerse es del orden de 100.000. La presencia de este pequeño número de átomos en las diversas partes del tratamiento químico puede descubrirse midiendo su actividad, sea mediante un contador de electrones, sea por el método de ionización (electrómetro Hoffmann).

Los resultados que hemos obtenido para el boro y el aluminio son los siguientes:

1. *Boro.* El polvo de boro constituido por granos compactos y poco atacables por los agentes químicos se presta mal a los experimentos. Se ha irradiado nitruro de boro BN[3]. Si se trata este compuesto con sosa diluida en caliente, se descompone con desprendimiento de amoníaco. Se deseca el residuo no volátil que contiene el boro, que se encuentra prácticamente inactivo, si bien la operación sólo ha durado seis minutos. *La actividad se ha separado del boro en forma de un compuesto gaseoso.* Puede descomponerse el nitruro de boro irradiado, por fusión con sosa en seco, en un recipiente al vacío unido a un tubo de vidrio de pared muy

---

[1] Sesión del 29 de enero de 1934.

[2] I. Curie y F. Joliot, *Comptes Rendus, 198,* 1934, p. 254.

[3] El nitrógeno irradiado por los rayos α del Po no da elementos que emitan una radiación duradera de positrones.

delgada sumergido en aire líquido. Después de la operación, que dura unos minutos, se cierra el tubo enfriado, en el cual se ha condensado NH_3 y se transporta a la cámara de ionización. Se constata que gran parte de la actividad inicial ha sido recogida en el tubo, y se verifica que esta actividad decrece con el período de 14 minutos. Por otra parte, un papel delgado embebido de ClH introducido en el tubo recoge una parte de la actividad al mismo tiempo que se forma $ClNH^4$.

Resulta de estos experimentos que *el elemento emisor de positrones es distinto del boro y se comporta químicamente como el nitrógeno.* Entre los núcleos susceptibles de producirse por transmutación del boro con o sin captura de la partícula α no se encuentra otra sustancia que forme un compuesto gaseoso que pueda desprenderse y recogerse en estas condiciones.

2. *Aluminio.* Se irradia una delgada hoja de aluminio. Después de medir la actividad se disuelve el aluminio en HCl y se evapora a sequedad. Se constata que el residuo seco ya no es activo. La operación ha durado tres minutos.

Se puede disolver el aluminio en un pequeño recipiente y recoger los gases desprendidos en un tubo de pared muy delgada introducido en un recipiente con agua. La operación dura tres minutos y medio. Se cierra el tubo y se coloca en la cámara de ionización. La mayor parte de la actividad no eliminada se encuentra en el tubo y puede seguirse su decrecimiento. El hidrógeno naciente producido al ser atacado el aluminio ha transformado el elemento radiactivo en un compuesto volátil que arrastra consigo hacia el tubo de pared delgada. Se sabe que en estas condiciones puede formarse PH_3. Puede comprobarse que, si se oxidan los átomos radiactivos durante la disolución de Al utilizando agua regia en lugar de ClH, el compuesto gaseoso no se forma. Por último, unos ensayos de precipitación de fosfato de circonio en medio ácido han revelado que la actividad puede quedar fijada en el precipitado mientras que Al pasa a la disolución. Tales reacciones muestran, de manera muy verosímil, que el elemento radiactivo, formado por transmutación de Al, tiene las propiedades químicas del fósforo.

Se están realizando ensayos del mismo tipo con Mg.

En definitiva estos experimentos revelan que las reacciones nucleares que hemos sugerido son con mucha probabilidad correctas. Los resultados obtenidos constituyen la primera prueba química de las transmutaciones y de la captura de las partículas α por los núcleos transformados. En efecto, las transmutaciones conocidas hasta aquí tienen lugar de manera casi instantánea y conducen a la formación de sustancias estables. No tenemos manera de verificar la naturaleza química de los átomos formados y para escribir las reacciones sólo nos guiamos por consideraciones energéticas. Por el contrario, en el caso en que la transmutación dé lugar a la creación de un núcleo radiactivo de vida media suficientemente larga, es posible, como hemos hecho, identificar la naturaleza química del átomo formado. Son pues razones de orden físico y químico las que demuestran que los núcleos ${}^{13}_{7}N$, ${}^{30}_{15}P$ y probablemente ${}^{27}_{14}Si$ deben ser radiactivos con emisión de electrones positivos. Proponemos denominar a estos nuevos elementos *radionitrógeno, radiofósforo* y *radiosilicio.*

2. CONFERENCIA-NOBEL, DICTADA EN ESTOCOLMO EL 12 DE DICIEMBRE DE 1935, POR IRÈNE JOLIOT-CURIE

Es un gran honor y una gran alegría para nosotros ver que la Academia de Ciencias de Suecia nos concede el premio Nobel por nuestros trabajos sobre la síntesis de los radioelementos, después de haberlo otorgado a Pierre y Marie Curie en 1903, y a Marie Curie en 1911, por el descubrimiento de los radioelementos.

Desearía evocar aquí el recuerdo del desarrollo extraordinario de la radiactividad, esa ciencia nueva que tuvo su origen hace menos de cuarenta años en los trabajos de Henri Becquerel y de Pierre y Marie Curie.

Sabemos que el esfuerzo de los químicos del siglo pasado estableció como un hecho fundamental la extraordinaria solidez de los edificios atómicos que constituyen las 92 especies químicas conocidas. Con el descubrimiento de los radioelementos, los físicos se encontraron por primera vez en presencia de sustancias extrañas, minúsculos generadores de radiaciones que poseían una densidad de energía enorme: los rayos alfa, átomos de helio cargados positivamente, los rayos beta, electrones cargados negativamente, animados unos y otros de una energía cinética que habría sido imposible comunicarles por medios humanos, y por último los rayos gamma, parecidos a rayos X muy penetrantes. Los químicos no quedaron menos sorprendidos al reconocer en los cuerpos radiactivos unos elementos que sufren modificaciones de la estructura atómica que se creía inmutable.

Cada emisión de radiación alfa o de radiación beta, acompaña a la transmutación de un átomo: la energía comunicada a estas radiaciones es de origen intraatómico. Mientras no se destruyen, los radioelementos tienen propiedades químicas bien definidas, como las de los elementos ordinarios. Estos átomos inestables se desintegran espontáneamente, unos muy rápidamente, otros muy lentamente, pero según reglas inmutables sobre las que jamás se ha podido influir. El tiempo necesario para la desaparición de la mitad de los átomos, llamado período, es una característica fundamental de cada radioelemento: según las sustancias, los valores de los períodos van de una fracción de segundo a millones de años.

El descubrimiento de los radioelementos ha tenido consecuencias inmensas para el conocimiento de la estructura de la materia; el estudio de estos cuerpos, el estudio de los potentes efectos que las radiaciones producen en los átomos ocupan los trabajos de muchos grandes institutos de investigación, en todos los países.

Sin embargo, la radiactividad era una propiedad que concernía exclusivamente a unos treinta cuerpos presentes en la naturaleza. La creación artificial de radioelementos abre un nuevo campo a la ciencia de la radiactividad y constituye así la prolongación de la obra de Pierre y Marie Curie.

Después del descubrimiento de las transmutaciones espontáneas de los radioelementos, la realización de las primeras transmutaciones artificiales se debe a lord Rutherford. Hace unos quince años, al bombardear con rayos alfa ciertos átomos ligeros, nitrógeno o aluminio, por ejemplo, lord Rutherford descubrió la expulsión de protones o núcleos de hidrógeno cargados positivamente; este hidrógeno provenía de los propios átomos bombardeados: era el resultado de una transmutación. Se ha podido establecer con certeza la naturaleza de la transformación nuclear: el átomo de aluminio, por ejemplo, captura la partícula alfa y se transforma después de la expulsión del protón en un átomo de silicio. La cantidad de materia transformada es imponderable y sólo el estudio de las radiaciones ha llevado a estas conclusiones.

A lo largo de estos últimos años, se han descubierto diversas transmutaciones artificiales de diferente tipo: unas están producidas por la radiación alfa, otras por los protones o los deuterones, núcleos de hidrógeno de masa 1 ó 2, otras por los neutrones, partículas neutras de masa 1, de las que el profesor Chadwick acaba de hablarnos. Las partículas expulsadas en la explosión del átomo son protones, rayos alfa o neutrones.

Estas transformaciones constituyen auténticas reacciones químicas que afectan la estructura íntima del átomo, el núcleo. Pueden representarse por fórmulas simples, como M. Joliot les explicará a continuación.

Voy a hablarles ahora de los experimentos que nos han conducido a obtener por transmutación elementos radiactivos nuevos. Estos experimentos han sido efectuados en común por M. Joliot y por mí misma, y la forma en que compartimos esta conferencia se debe sólo a la comodidad de la exposición.

Al estudiar las transmutaciones con emisión de neutrones producidas en los elementos ligeros irradiados con rayos alfa, hemos observado ciertas dificultades de interpretación en el caso de la emisión de neutrones por el flúor, el sodio y el aluminio. El aluminio puede transformarse por captura de una partícula alfa y expulsión de un protón en un átomo estable de silicio. Por el contrario, si hay emisión de un neutrón, el producto de la reacción no es un átomo conocido.

A continuación, hemos observado que el aluminio y el boro, irradiados por rayos alfa, no emiten sólo protones y neutrones, sino que hay también emisión de electrones positivos. Hemos supuesto entonces que la emisión del neutrón y del electrón positivo se producía simultáneamente, en lugar de la emisión de un protón; el átomo residual debía ser el mismo en ambos casos.

A principios del año 1934, al estudiar las condiciones de emisión de estos electrones positivos, nos hemos dado cuenta de una diferencia fundamental entre esta transmutación y todas las que se habían producido hasta entonces; todas las reacciones de química nuclear provocadas eran fenómenos instantáneos, explosiones. Por el contrario, la emisión de electrones positivos producida por el aluminio bajo la acción de una fuente de rayos alfa, prosigue durante algún tiempo después de retirar la fuente. El número de electrones emitidos decrece a la mitad en tres minutos.

Se trata pues aquí de una verdadera radiactividad que se manifiesta por la emisión de electrones positivos.

Hemos mostrado que se podía asimismo comunicar una radiactividad con emisión de electrones positivos o negativos al boro o al magnesio, mediante bombardeo de rayos alfa. Estos radioelementos artificiales se comportan en todo como los radioelementos naturales.

Al volver a considerar nuestra hipótesis de la transmutación del núcleo de aluminio en núcleo de silicio, hemos supuesto que el

fenómeno se produce en dos tiempos; hay en primer lugar captura de la partícula alfa y expulsión instantánea del neutrón, con formación de un átomo radiactivo que es un isótopo del fósforo de masa 30, mientras que el átomo estable de fósforo tiene una masa igual a 31. A continuación, este átomo inestable, este radioelemento nuevo, que nosotros hemos denominado «radiofósforo», se destruye según una ley exponencial caracterizada por un período de 3 minutos.

Hemos interpretado de una manera similar la producción de elementos radiactivos en el boro y el magnesio; en el primer caso hay producción de un nitrógeno inestable de período 11 minutos, en el segundo caso, de isótopos inestables del silicio y del aluminio.

3. CONFERENCIA-NOBEL, DICTADA EN ESTOCOLMO EL 12 DE DICIEMBRE DE 1935, POR FRÉDÉRIC JOLIOT

La interpretación de nuestros primeros experimentos se basaba, tal como Mme. Joliot-Curie acaba de exponer, en unos hechos de orden puramente físico. Creímos que sería posible, gracias a los métodos de la radioquímica, justificar nuestras hipótesis, proporcionar una prueba química de la realidad de las transmutaciones provocadas.

Las primeras pruebas indiscutibles de la transformación de elementos en elementos químicos diferentes las proporcionó el estudio de los fenómenos de la radiactividad. No cabe ninguna duda de que el radio se transforma espontáneamente en un gas activo, el radón, emitiendo partículas alfa o heliones. Podemos escribir con certeza la reacción nuclear correspondiente[1]:

$$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

puesto que las cantidades de los diversos elementos que entran en esta reacción pueden ser suficientes para que haya sido posible emprender con éxito su identificación química y espectroscópica.

La serie de transformaciones radiactivas nos da muchos ejemplos en los que las cantidades de radioelementos son pequeñas en extremo, imponderables, y sin embargo, mediante los métodos de la radioquímica ha sido posible estudiar correctamente sus propiedades químicas e identificar algunos de ellos como isótopos de elementos activos o inactivos disponibles en gran cantidad.

[1] Se coloca arriba y a la izquierda del símbolo químico el número másico; abajo y a la izquierda el número de carga nuclear.

Esta química particular, en la que se manipulan cantidades imponderables, a veces del orden de 10^{-16} g, ha sido posible gracias al hecho de que se pueden dosificar y seguir, por la medición de la radiación emitida, las trazas infinitesimales de materia radiactiva dispersa en el seno de otras materias.

Si podemos escribir con certeza la reacción nuclear correspondiente a la mayor parte de transmutaciones espontáneas, no ocurre los mismo en el caso de las transmutaciones provocadas.

El rendimiento de estas transmutaciones es muy bajo y las masas de elementos formados empleando las fuentes de proyectiles más intensas que sabemos producir actualmente son inferiores a 10^{-15} g, representadas como máximo por algunos millones de átomos. Sin embargo, puede deducirse la naturaleza de los átomos formados con una seguridad bastante grande si admitimos, para escribir la reacción nuclear correspondiente, que por una parte se cumple la conservación del número másico, y por otra, se cumple la conservación del número de carga nuclear entre los elementos que entran en reacción y los elementos formados.

Por ello el núcleo de aluminio que captura un helión debe transformarse en silicio cuando hay emisión de un protón.

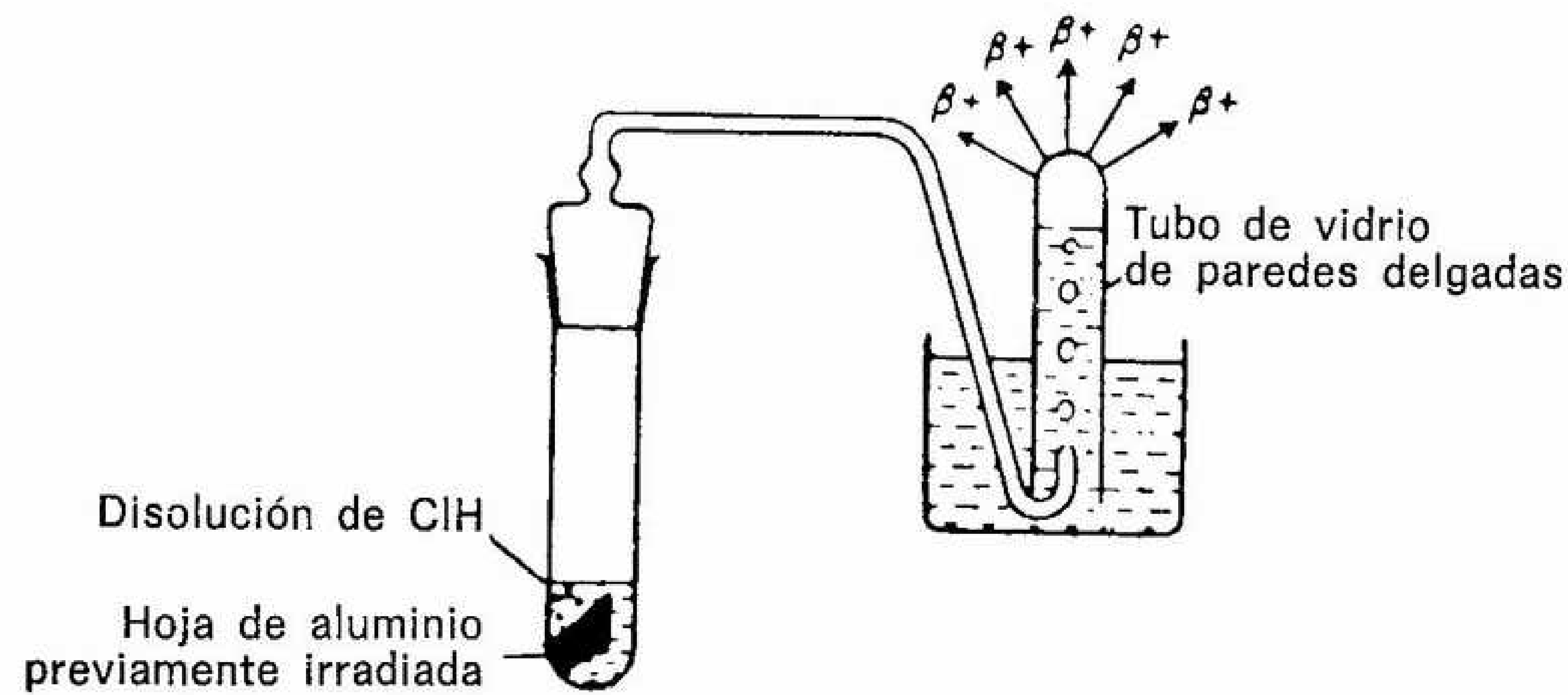
$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} = {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \qquad \begin{array}{l} 27 + 4 = 30 + 1 \\ 13 + 2 = 14 + 1 \end{array}$$

El átomo formado es con mucha probabilidad el silicio, pero dado que este elemento se encuentra presente en cantidad infinitesimal, no es posible identificarlo químicamente. En cambio, cuando el átomo formado es radiactivo, podemos identificarlo empleando los métodos de la radioquímica. Por ejemplo, en el caso en que el aluminio irradiado con rayos alfa emite neutrones, la regla precedente permite escribir la reacción de transmutación siguiente:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} = {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Al ser radiactivo el átomo formado podemos verificar que tiene las propiedades químicas del fósforo.

Una fina lámina de aluminio, irradiada previamente con rayos alfa, es atacada y disuelta en una disolución de ácido clorhídrico (véase figura pág. sig.). La reacción química produce hidrógeno



Separación química del radiofósforo.

naciente que arrastra el elemento radiactivo hacia un tubo de paredes finas bajo una campana de agua. Esta separación muestra con certeza que se ha formado un elemento químico distinto al aluminio cuando se ha irradiado con heliones, y nos proporciona una prueba indiscutible de las transmutaciones provocadas; por otra parte, se habrían separado trazas de fósforo del aluminio en las mismas condiciones.

En fin, el aluminio activado puede disolverse en una mezcla ácida oxidante. Se añade a la disolución una pequeña cantidad de fosfato de sodio y de una sal de circonio y se comprueba que, al precipitar, el fosfato de circonio arrastra el elemento radiactivo. Estos experimentos en el caso del aluminio son delicados, puesto que deben realizarse en unos seis minutos, ya que la vida media de los átomos radiactivos formados es inferior a cinco minutos. Unos ensayos químicos del mismo tipo nos han demostrado que el radioelemento formado en el boro bajo la acción de los rayos alfa es un isótopo del nitrógeno.

Hemos propuesto dar a estos radioelementos nuevos (isótopos, que no existen en la naturaleza, de elementos conocidos) los nombres de radionitrógeno, radiofósforo, radioaluminio (en el caso del magnesio irradiado con rayos alfa) y designarlos por los símbolos: RN^{13}, RP^{30}, RAl^{28}.

Inmediatamente después de estas primeras investigaciones, sugerimos que el mismo fenómeno podría tener lugar en el caso de unos tipos de transmutaciones provocadas por el choque de otras

partículas distintas a los rayos alfa; por ejemplo, neutrones, protones o deuterones.

Estos experimentos fueron realizados y desarrollados en diversos países. En Gran Bretaña y en EE.UU., donde los físicos disponen de instalaciones de muy alta tensión, se prepararon diversos elementos nuevos con la ayuda de los protones y deuterones como proyectiles. En Italia, en primer lugar, y después en otros países, los investigadores, en particular Fermi y sus colaboradores, utilizaron los neutrones, proyectiles de elección, para provocar las transmutaciones. Se crearon así numerosos elementos nuevos, entre ellos el radiofósforo RP^{32} y el radiohafnio, de períodos respectivos de 17,5 días y de algunos meses. Actualmente, es posible realizar la síntesis, a menudo mediante varios procedimientos (el radioaluminio RAl^{28} puede formarse por transmutaciones de cinco tipos diferentes), de más de 50 radioelementos nuevos, número ya superior al de los radioelementos naturales que se encuentran en la corteza terrestre. Fue realmente una gran satisfacción para nuestra recordada maestra Marie Curie haber visto prolongarse así la lista de los radioelementos que ella, en compañía de Pierre Curie, había tenido la gloria de iniciar.

La diversidad de propiedades químicas y la diversidad de vidas medias de estos radioelementos sintéticos permitirán sin duda nuevas investigaciones en biología y en fisicoquímica. Para llevar a buen término estos trabajos, será necesario disponer de cantidades relativamente importantes de estos radioelementos. Este objetivo se alcanzará empleando proyectiles acelerados artificialmente. Existen ya en diversos países dispositivos que responden a ese objeto. En Francia, hemos construido dos instalaciones que nos han permitido recientemente obtener radioelementos en cantidades cien veces más elevadas que las que obtuvimos en nuestros primeros experimentos. En el próximo futuro, estas cantidades serán superadas ampliamente.

El método de los indicadores radiactivos hasta ahora reservado a los elementos de masa atómica elevada puede ampliarse a un gran número de elementos distribuidos por toda la clasificación periódica. En biología, por ejemplo, el método de los indicadores, que emplea los radioelementos sintéticos, permitirá estudiar con mayor facilidad el problema de la localización y de la eliminación de elementos diversos introducidos en los organismos vivos. En este caso, la radiactividad sirve sólo para determinar la presencia de un elemento en tal o cual región del organismo. No es útil, en estas

investigaciones, introducir cantidades importantes del indicador radiactivo. Estas cantidades vienen determinadas por la sensibilidad del aparato detector de radiación y el tamaño del organismo vegetal o animal. En los lugares donde se localicen los radioelementos —lugares que así será posible conocer mejor— la radiación que emiten producirá su acción sobre las células vecinas. Para este segundo modo de empleo, será necesario utilizar cantidades importantes de radioelementos. Esto encontrará probablemente aplicaciones prácticas en medicina.

Del conjunto de los hechos examinados, comprendemos que los centenares de átomos de especies diferentes que constituyen nuestro planeta no deben considerarse creados de una vez por todas y eternos. Los observamos porque han sobrevivido. Otros menos estables han desaparecido. Algunos de estos átomos desaparecidos son probablemente los que se regeneran en los laboratorios. Hasta ahora, sólo se han obtenido elementos de vida relativamente breve, que va de una fracción de segundo a unos meses. Para crear una cantidad apreciable de un elemento de vida mucho más larga, habría que disponer de una fuente de proyectiles prodigiosamente intensa. ¿Hay alguna esperanza de realizar este nuevo sueño?

Si, mirando al pasado, contemplamos los progresos logrados por la ciencia a un ritmo siempre creciente, es lícito creer que los investigadores, al construir o quebrar los elementos a voluntad, serán capaces de realizar transmutaciones de carácter explosivo, verdaderas reacciones químicas en cadena.

Si estas transmutaciones llegan a propagarse en la materia, puede concebirse la enorme liberación de energía utilizable que tendrá lugar. Pero si, por desgracia, la reacción llegara a extenderse por todos los elementos de nuestro planeta, debemos prever con temor las consecuencias del desencadenamiento de un cataclismo así. Los astrónomos observan a veces que una estrella de brillo mediocre aumenta bruscamente de magnitud, una estrella invisible a simple vista puede llegar a ser muy brillante y visible sin instrumentos, es la aparición de una nova. Esa brusca conflagración de la estrella es quizás provocada por esas transmutaciones de carácter explosivo, proceso que sin duda los investigadores tratarán de realizar, tomando —confiamos en ello— las precauciones necesarias.

4. ALGUNAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

Partícula	Masa (expresada en MeV)	Vida media (segundos) (ver recuadro pág. 15)
$e\pm$	0,511	estable
$\mu\pm$	105,7	$2{,}20 \cdot 10^{-6}$
$\pi\pm$	139,6	$2{,}60 \cdot 10^{-8}$
π^0	135,0	$0{,}83 \cdot 10^{-16}$
$K\pm$	493,7	$1{,}24 \cdot 10^{-8}$
p	938,3	estable ($> 8 \cdot 10^{30}$ años)
n	939,6	925
Λ^0	1115,6	$2{,}63 \cdot 10^{-10}$

5. CONVERSIÓN DE UNIDADES DE LONGITUD

1 F o fm (fermi o femtómetro) = 10^{-13} cm. = 10^{-15} m.
1 Å (angström) = 10^{-4} μ (micrón) = 10^{-10} m.
La unidad de longitud anglosajona de 1 pulgada (1 inch) es igual a 2,54 cm.

6. ALGUNOS EJEMPLOS DE RADIOISÓTOPOS Y DE SUS RADIACIONES

Núcleo	Período	Radiaciones principales, con energías en MeV[1]
$^{1}_{0}$n	10,8 m	β^- 0,8 –
^{3}H	12,32 a	β^- 0,019 –
^{6}He	0,81 s	β^- 3,5 –
^{7}Be	53,3 d	capt. γ 0,48
^{10}Be	$1{,}6 \cdot 10^6$ a	β^- 0,6–
^{11}C	20,4 m	β^+ 1,0 –
^{14}C	5730 a	β^- 0,16 –
^{13}N	10 m	β^+ 1,2 –
^{15}O	2,03 m	β^+ 1,7 –
^{18}F	110 m	β^+ 0,6 –
^{24}Na	15,0 h	β^- 1,4... γ 2,75 1,37...
^{28}Al	2,25 m	β^- 2,9 γ 1,78
^{30}P	2,50 m	β^+ 3,2... γ 2,23...
^{32}P	14,3 d	β^- 1,7 –
^{35}S	87,5 d	β^- 0,2 –
^{36}Cl	$3{,}0 \cdot 10^5$ a	β^- 0,7 capt. β^+... –
^{37}Ar	35,0 d	capt. –
^{40}K [0,012 %]	$1{,}28 \cdot 10^9$ a	β^- 1,3 capt. β^+... γ 1,46
^{55}Fe	2,7 a	capt. –
^{60}Co	5,27 a	β^- 0,3 1,5... γ 1,33 1,17...
^{64}Cu	12,7 h	β^- 0,6 capt. β^+ 0,7 γ (1,35)
^{80}Br	17,6 m	β^- 2,0... capt. β^+ 0,9 γ 0,62 0,67...
$^{80\,m}$Br	4,42 h	γ 0,049 0,037
^{87}Rb [27,8 %]	$4{,}8 \cdot 10^{10}$ a	β^- 0,3 –
^{90}Sr	28,5 a	β^- 0,5 –
$^{99\,m}$Tc	6,0 h	γ 0,141 β^- γ (0,33)
^{123}I	13,2	capt. γ 0,16...

[1] Para las radiaciones β principales, se dan las energías máximas de los espectros. Las energías entre paréntesis corresponden a las radiaciones γ de baja intensidad.
–significa: no hay radiación γ.

Núcleo	Período	Radiaciones principales, con energías en MeV
^{125}I	60,1 d	capt. γ 0,035
^{128}I	25 m	β^- 2,1... capt. β^+... γ 0,44 0,53
^{131}I	8,0 d	β^- 0,6 0,8... γ 0,36 0,64 0,28
^{133}Xe	5,25 d	β^- 0,3 γ 0,081
$^{133\,m}$Xe	2,19 d	γ 0,23
^{137}Cs	30,2 a	β^- 0,5 1,2 γ 0,66 (de $^{137\,m}$Ba)
^{198}Au	2,69 d	β^- 1,0 1,4 γ 0,41
$^{198\,m}$Au	2,3 d	γ 0,21 0,097 0,18...
^{208}Tl(ThC”)	3,05 m	β^- 1,8 2,4... γ 2,61 0,58...
^{210}Pb(RaD)	22,3 a	β^- 0,02 0,06 γ 0,047 α 3,72
^{210}Po	138,4 d	α 5,3 γ (0,80)
^{220}Rn(Tn)	55,6 s	α 6,29 γ (0,55)
^{222}Rn	3,82 d	α 5,49 γ (0,51)
^{226}Ra	1600 a	α 4,78 4,60 γ 0,19
^{227}Ac	21,8 a	β^- 0,04 α 4,95 4,94... γ
^{232}Th [100 %]	$1{,}4 \cdot 10^{10}$ a	α 4,01 3,95 γ
^{235}U [0,72 %]	$7{,}04 \cdot 10^8$ a	α 4,4 γ 0,19...
^{238}U [99,28 %]	$4{,}47 \cdot 10^9$ a	α 4,2 γ
^{239}Np	2,35 d	β^- 0,4 0,7... γ 0,11 0,28 0,23...
^{239}Pu	$2{,}41 \cdot 10^4$ a	α 5,16 5,14 γ
^{241}Am	433 a	α 5,49 5,44 γ 0,060...
^{252}Cf	2,64 a	α 6,12 6,08 fisión espontánea (3 %)

capt.: radiactividad por captura de electrones.
Para los radioisótopos de período superior a 500 millones de años se da entre corchetes la abundancia del isótopo en la naturaleza.

7. CORRESPONDENCIA DE LAS UNIDADES DE ENERGÍA

1 eV = $1{,}60 \cdot 10^{-12}$ ergios = $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ julios.
1 u.m.a. (unidad de masa atómica, que es 1/12 de la masa del átomo de ^{12}C)
1 MeV corresponde a $1{,}78 \cdot 10^{-27}$ g.
1 eV por partícula corresponde aproximadamente a 1160 grados (Kelvin)

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página 12: Archivos Seuil. Págs. 45, 47, 71, 86, 92, 100, 101, 108, 109, 112, 121 y 136: Archivos del Laboratorio Curie. Págs. 53 y 79: Cavendish Laboratory, University of Cambridge. Págs. 59 y 145: Archivos Institut Niels Bohr, Copenhague. Pág. 64: Cortesía AIP Niels Bohr Library (Con la autorización de Lawrence Radiation Laboratory). Pág. 33 arriba: P.M.S. Blackett en *Proceedings of the Royal Society*, Londres, 1925. Pág. 33 abajo: M. Lecoin en *Radioactivité* por Mme. Pierre Curie, París, Hermann, 1935. Pág. 69: C. D. Anderson en *Phisical Review*, 1933. Pág. 72: I. Curie y F. Joliot, *Le Journal de physique et le radium*, 1933. Pág. 73: J. Chadwick, *Proceedings of the Royal Society*, Londres, 1932. Págs. 75 y 129: R. D. Evans, *The Atomic Nucleus*, Nueva York, Mc Graw Hill, 1972. Pág. 77: E. Fermi, *Z. für Physik*, 1934. Pág. 80: AIP Niels Bohr Library. Pág. 87: Archivos del Laboratorio Curie. Pág. 90: Benjamin Couprie. Pág. 95: Notas de P. Radvanyi del curso de F. Joliot del Collège de France. Pág. 99: Science Museum de Londres. Pág. 103: Archivos del Laboratorio Curie (André Kertesz). Pág. 111: Archivos del Laboratorio Curie (Karl Wallberg). Pág. 113: Archivos del Laboratorio Curie (Robert Doisneau). Pág. 115: Archivos del Laboratorio Curie (Interpress). Pág. 116: Otto y Pirou. Pág. 118: Archivos del Laboratorio Curie (Acme Pictures). Pág. 119: Spadem. Pág. 149: Universidad de Chicago. Pág. 152: Dietrich Hahn. Pág. 155: Por cortesía de G. T. Seaborg, Lawrence Berkeley Lab., University of California. Pág. 169 arriba: Photo Schuller. Pág. 169 abajo: Documentación CEA. Pág. 174: Documento CEA. Pág. 179: Servicio hospitalario F. Joliot-Curie, Orsay. Pág. 185: Observatorio Lick, University of California, Santa Cruz.